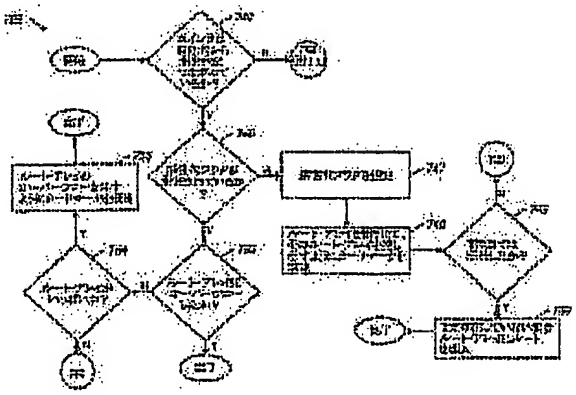
METHOD AND DEVICE FOR DYNAMIC GENERATION MANAGEMENT OF COMPUTER MEMORY

Publication number: JP2000047931 (A)
Publication date: 2000-02-18
Inventor(s): GRARUP STEFFEN; BAK LARS
Applicant(s): SUN MICROSYSTEMS INC
Classification:
- international: ***G06F12/00; G06F9/44; G06F12/02;*** **G06F12/00; G06F9/44; G06F12/02;** (IPC1-7): G06F12/00; G06F9/44
- European: G06F12/02D2G4G
Application number: JP19990100480 19990302
Priority number(s): US19980077069P 19980306

Also published as:
EP0940755 (A1)
EP0940755 (B1)
DE69932874 (T2)
CN1236921 (A)
CN100343821 (C)

Abstract of **JP 2000047931 (A)**

PROBLEM TO BE SOLVED: To execute a generation garbage collection in a computer memory by generating a new route array through the use of a prescribed marker when reference to a second object is stored after the execution of the second garbage collection. SOLUTION: When it is judged that a new generation pointer is not set (S746), the new generation pointer indicating that a pointer is connected from an old generation to the new one, is set (747). Then, the route array is assigned and a card mark is set so as to indicate the assigned route array (S748). Then, whether route array assignment has succeeded or not is judged (S749). When the assignment of the route array has succeeded, a route tracked by the route array is inserted (S750). In the meantime, at the time of failure in assignment, the card mark indicating that the route array overflows is set (S755).



(19)日本国特許庁（ＪＰ）　(12)公開特許公報（Ａ）　(11)特許出願公開番号
特開2000－47931
（P2000－47931A）
(43)公開日　平成12年２月18日(2000.2.18)

(51)Int.Cl.'	識別記号	Ｆ Ｉ		テーマコード'（参考）
Ｇ０６Ｆ　12/00	５９１	Ｇ０６Ｆ　12/00	５９１	
9/44	５３０	9/44	５３０Ｓ	

審査請求　未請求　請求項の数25　ＯＬ　外国語出願　（全 78 頁）

(21)出願番号　特願平11－100480

(22)出願日　平成11年３月２日(1999.3.2)

(31)優先権主張番号　６０／０７７，０６９

(32)優先日　平成10年３月６日(1998.3.6)

(33)優先権主張国　米国（ＵＳ）

(71)出願人　591064003
サン・マイクロシステムズ・インコーポレーテッド
ＳＵＮ　ＭＩＣＲＯＳＹＳＴＥＭＳ，ＩＮＣＯＲＰＯＲＡＴＥＤ
アメリカ合衆国　94303　カリフォルニア州・パロ　アルト・サン　アントニオ　ロード・901

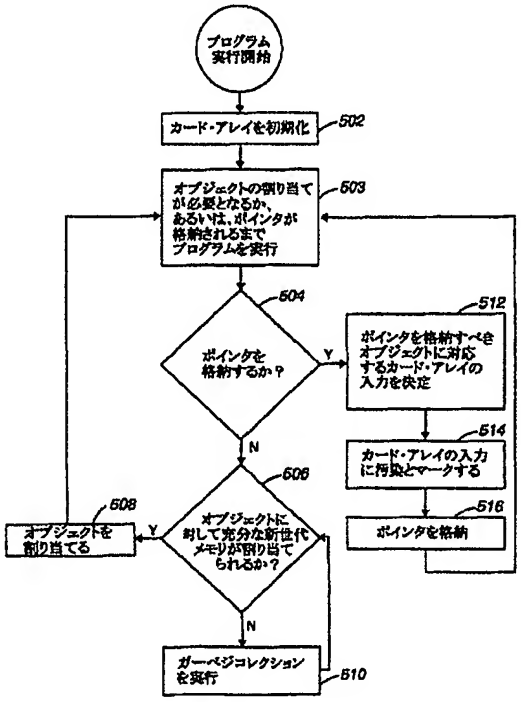
(72)発明者　ステファン・グラップ
アメリカ合衆国　カリフォルニア州94303　パロ・アルト，クララ・ドライブ，825

(74)代理人　100096817
弁理士　五十嵐　孝雄　（外２名）

最終頁に続く

(54)【発明の名称】　コンピュータメモリの世代動的管理のための方法及び装置

(57)【要約】　（修正有）
【課題】　コンピュータメモリ内で世代ガーベジコレクションを実行するための方法を提案する。
【解決手段】　第１メモリ部と、関連マーカーを各々有する複数のブロックに分割される第２メモリ部とを含むメモリの第１メモリ部上で第１のガーベジコレクションを実行し、また、第２メモリ部の複数のブロックのうちの所定のブロック上で、第２のガーベジコレクションを実行する。さらに、第２メモリ部の所定のブロック上で、第３のガーベジコレクションを実行する。それには、所定のブロックに関連するマーカーによって表わされるステータスの少なくとも一部に基づいて、所定のブロックがその所定のブロック内に含まれていない第２のオブジェクトを参照するところの第１のオブジェクトを含むか否かの判定を含む。



【特許請求の範囲】

【請求項１】　コンピュータシステムに関係し、第１メモリ部と、関連マーカーを各々有する複数のブロックに分割される第２メモリ部と、を含むメモリを、動的に管理するためのコンピュータ実現方法であって、
前記第１メモリ部上で、第１のガーベジコレクションを実行する工程と、
前記第２メモリ部の前記複数のブロックのうちの所定のブロック上で、第２のガーベジコレクションを実行する工程と、
前記第２メモリ部の前記所定のブロック上で、第３のガーベジコレクションを実行する工程であって、前記第３のガーベジコレクションは、前記所定のブロックに関連するマーカーによって表わされるステータスの少なくとも一部に基づいて、前記所定のブロックが、該所定のブロック内に含まれていない第２のオブジェクトを参照するところの第１のオブジェクトを含むか否かの判定を含み、前記ステータスは、前記第２のガーベジコレクションの実行後に前記第２のオブジェクトへのリファレンスが記憶されたか否かの表示を含む工程と、
前記第２のガーベジコレクションの実行後に前記第２のオブジェクトへのリファレンスが記憶された場合に、前記所定のマーカーを用いて、新たなルート・アレイを生成する工程と、
を備えることを特徴とするコンピュータ実現方法。

【請求項２】　請求項１に記載のコンピュータ実現方法であって、
前記第１のオブジェクトが前記所定のブロック内に含まれていない第２のオブジェクトを参照しないと判定された場合に、前記所定のブロックを解放する工程を更に備えることを特徴とするコンピュータ実現方法。

【請求項３】　請求項１および請求項２のいずれか一方に記載のコンピュータ実現方法であって、
前記所定のブロックが第２のオブジェクトを参照する第１のオブジェクトを含むと判定された場合に、前記第３のガーベジコレクションを実行する工程は、更に、
前記所定のブロックマーカーを用いて、前記第２のオブジェクトが前記第１メモリ部内に存在するか否かを判定する工程と、
前記第２のオブジェクトが前記第１メモリ部内に存在すると判定された場合に、前記所定のブロックマーカーに関連するルート・アレイが前記第２のオブジェクトへのポインタを含むように、前記所定のブロックマーカーに関連する前記ルート・アレイを更新する工程と、
を備えることを特徴とするコンピュータ実現方法。

【請求項４】　請求項１および請求項２のいずれか一方に記載のコンピュータ実現方法であって、
前記所定のブロックが第２のオブジェクトを参照する第１のオブジェクトを含むと判定された場合に、前記第３のガーベジコレクションを実行する工程は、更に、
前記所定のブロックマーカーを用いて、前記第２のオブジェクトが前記第２メモリ部内に存在するか否かを判定する工程と、
前記第２のオブジェクトが前記第２メモリ部内に存在すると判定された場合に、他のオブジェクトへのリファレンスを認定するように、前記所定のブロックマーカーに関連するルート・アレイを走査する工程と、
を備えることを特徴とするコンピュータ実現方法。

【請求項５】　請求項４に記載のコンピュータ実現方法であって、
他のオブジェクトへのリファレンスを追跡する工程を更に備えることを特徴とするコンピュータ実現方法。

【請求項６】　請求項１および請求項２のいずれか一方に記載のコンピュータ実現方法であって、
前記複数のブロックが複数のトレインとして用意され、
前記所定のブロックが、前記複数のトレインのうちの第１トレインに含まれると共に、前記第３のガーベジコレクションを実行する工程が、更に、
前記ブロックに関連する前記マーカーによって表わされる前記ステータスの少なくとも一部に基づいて、前記第２のオブジェクトが、前記複数のトレインのうちの第２トレインに存在するか否かを判定する工程を備えることを特徴とするコンピュータ実現方法。

【請求項７】　請求項６に記載のコンピュータ実現方法であって、
前記第２のオブジェクトが前記複数のトレインのうちの第２トレインに存在しないと判定された場合に、前記第２トレインを解放する工程を更に備えることを特徴とするコンピュータ実現方法。

【請求項８】　請求項１および請求項２のいずれか一方に記載のコンピュータ実現方法であって、
前記複数のブロックが複数のカーとして用意され、前記複数のカーが、更に、複数のトレインとして用意され、
前記所定のブロックが、前記複数のトレインのうちの所定のトレインを形成する複数のカーのうちの第１カーに含まれると共に、前記第３のガーベジコレクションを実行する工程が、更に、
前記ブロックに関連する前記マーカーによって表わされる前記ステータスの少なくとも一部に基づいて、前記第２のオブジェクトが、前記所定のトレインを形成する前記複数のカーのうちの第２カーに存在するか否かを判定する工程を備えることを特徴とするコンピュータ実現方法。

【請求項９】　請求項８に記載のコンピュータ実現方法であって、
前記第２のオブジェクトが前記所定のトレインの前記第２カーに存在しないと判定された場合に、前記第２カーを解放する工程を更に備えることを特徴とするコンピュータ実現方法。

【請求項１０】　コンピュータシステムに関係し、関連

マーカーを各々有する複数のブロックに分割されるメモリを、動的に管理するためにコンピュータ実現方法であって、
前記複数のブロックのうちの所定のブロック上で、第１のガーベジコレクションを実行する工程と、
前記所定のブロック上で、第２のガーベジコレクションを実行する工程であって、前記第２のガーベジコレクションは、前記所定のブロックに関連するマーカーによって表わされるステータスの少なくとも一部に基づいて、前記所定のブロックが、前記所定のブロック内に含まれていない第２のオブジェクトを参照するところの第１のオブジェクトを含むか否かの判定を含み、前記マーカーで表わされる前記ステータスは、前記第１のガーベジコレクションの実行後に前記第２のオブジェクトへのリファレンスが記憶されたか否かの表示を含む工程と、
前記第１のガーベジコレクションの実行後に前記第２のオブジェクトへのリファレンスが記憶された場合に、前記所定のブロックを用いて、新たなルート・アレイを生成する工程と、
を備えることを特徴とするコンピュータ実現方法。
【請求項１１】　請求項１０に記載のコンピュータ実現方法であって、
前記第１のオブジェクトが前記所定のブロック内に含まれていない第２のオブジェクトを参照しないと判定された場合に、前記所定のブロックを解放する工程を更に備えることを特徴とするコンピュータ実現方法。
【請求項１２】　請求項１０および請求項１１のいずれか一方に記載のコンピュータ実現方法であって、
前記複数のブロックが複数のトレインとして用意され、前記所定のブロックが、前記複数のトレインのうちの第１トレインに含まれると共に、前記ガーベジコレクションを実行する工程が、更に、
前記ブロックに関連する前記マーカーによって表わされる前記ステータスの少なくとも一部に基づいて、前記第２のオブジェクトが、前記複数のトレインのうちの第２トレインに存在するか否かを判定する工程を備え、
前記方法は、前記第２のオブジェクトが前記複数のトレインのうちの第２トレインに存在しないと判断された場合、前記第２トレインを解放する工程を更に備えることを特徴とするコンピュータ実現方法。
【請求項１３】　請求項１０に記載のコンピュータ実現方法であって、
追加メモリ部が設けられ、前記第２のオブジェクトが前記所定のブロック内に含まれないと判定された場合に、前記所定のブロック上で前記ガーベジコレクションを実行する工程が、更に、
前記所定のブロックに関連する前記マーカーによって表わされる前記ステータスの少なくとも一部に基づいて、前記第２のオブジェクトが前記追加メモリ部に含まれるか否かを判定する工程を備えることを特徴とするコンピュータ実現方法。
【請求項１４】　第１部分と、第２部分と、前記第２部分の要素に関連するワードのアレイと、を含み、前記ワードが、その関連要素の内容が前記第１部分のオブジェクトを参照しているか否かを示すように用意されるコンピュータメモリ内で、所定のオブジェクトを割り当てるためのコンピュータ実現方法であって、
前記第１部分が、前記所定のオブジェクトを割り当てるのに適しているかどうかを判定する工程と、
前記第１部分が前記所定のオブジェクトを割り当てるのに適していると判定された場合には、前記所定のオブジェクトを割り当てる工程と、
前記第１部分が前記所定のオブジェクトを割り当てるのに適していないと判定された場合には、前記第１部分でガーベジコレクションを実行する工程であって、前記ガーベジコレクションを実行する工程が、前記第２部分内の関連要素が前記第１部分内の特定のオブジェクトを参照することを表わす所定のワードの位置決めを行うようにワードの前記アレイを走査する工程を備え、前記ガーベジコレクションの実行中、前記第１部分内の前記特定のオブジェクトを保持する工程と、
を備えることを特徴とするコンピュータ実現方法。
【請求項１５】　請求項１４に記載のコンピュータ実現方法であって、
前記第２部分内の関連要素が前記特定のオブジェクトを参照することを表わす前記所定のマーカーが位置決めされた場合に、前記第１部分でガーベジコレクションを実行する工程は、更に、
前記第２部分の関連要素内部で複数のルートの関係を追跡する工程を備え、前記複数のルートの関係を追跡する工程が、前記コンピュータメモリ内部の新しい位置に前記複数のルートを更新して、前記所定のワードを更新する工程を備えることを特徴とするコンピュータ実現方法。
【請求項１６】　請求項１５に記載のコンピュータ実現方法であって、
前記所定のワードを更新する工程は、
前記複数のルートのうちの所定のルートが前記第２部分に存在し、前記第１部分内の前記特定のオブジェクトのうちの選択されたオブジェクトを参照する場合を判定する工程と、
前記所定のルートが前記第２部分に存在し、前記第１部分内の前記選択された特定のオブジェクトを参照する場合には、前記所定のルートが前記第２部分に存在し、前記選択された特定のオブジェクトが前記第１部分に存在することを示す前記所定のワードを更新する工程と、
を備えることを特徴とするコンピュータ実現方法。
【請求項１７】　請求項１４に記載のコンピュータ実現方法であって、
前記第２部分でガーベジコレクションを実行する工程を

更に備え、前記ガーベジコレクションを実行する工程は、前記要素のうちの所定の要素に関連するルートの関係を追跡する工程を備え、前記ルートが新世代に関連し、前記ルートの関係を追跡する工程は、ワードの前記アレイに含まれるワードのいくつかを更新する工程を含むことを特徴とするコンピュータ実現方法。

【請求項１８】　第１メモリ部と、複数の要素として用意される第２メモリ部と、を備えるコンピュータシステムにおいて用いられ、前記複数の要素から選択された第１要素と関連するマーカーであって、

前記選択された第１要素が前記第１メモリ部内部に含まれるオブジェクトを参照するか否かを認定するように用意される第１インディケータを備えることを特徴とするマーカー。

【請求項１９】　請求項１８に記載のコンピュータシステムにおいて用いられるマーカーであって、

更に、前記オブジェクトへのリファレンスを含み、前記オブジェクトへのリファレンスが、前記オブジェクトに関するアドレスを含むアレイに対するポインタであることを特徴とするマーカー。

【請求項２０】　コンピュータシステムであって、

第１メモリ部と、複数のブロックに分割される第２メモリ部とを含むメモリと、

マーカーのアレイであって、各々のマーカーが前記第２メモリ部内の関連ブロックに対応し、前記マーカーが、それら関連ブロックが関連ブロック外部のオブジェクトを参照する場合を表わすように配置されているマーカーの前記アレイと、

ルート・アレイの集合であって、前記ルート・アレイが、前記オブジェクトのアドレスを保持するように用意され、マーカーの前記アレイから選択された所定のマーカーが前記ルート・アレイの集合に関連するような前記ルート・アレイの集合と、

前記第１メモリ部内のスペースを回収するための第１ガーベジコレクタと、

マーカーの前記アレイに含まれるマーカーのステータスの少なくとも一部に基づいて、前記第２メモリ部内のスペースを回収するための第２ガーベジコレクタと、

を備えるコンピュータシステム。

【請求項２１】　請求項２０に記載のコンピュータシステムであって、

マーカーの前記アレイから選択される第１マーカーが、前記第１マーカーの前記関連ブロックが前記第１メモリ部内の第１オブジェクトを参照する場合を認定する部分インディケータを含むことを特徴とするコンピュータシステム。

【請求項２２】　請求項２０および請求項２１のいずれか一方に記載のコンピュータシステムであって、

前記複数のブロックが複数のカーとして用意され、前記複数のカーが更に複数のトレインとして用意されることを特徴とするコンピュータシステム。

【請求項２３】　コンピュータシステムであって、

複数のブロックに分割されるメモリと、

マーカーのアレイであって、各々のマーカーが前記メモリ内の関連ブロックに対応し、前記マーカーが、それら関連ブロックが関連ブロック外部のオブジェクトを参照する場合を表わすように配置されているマーカーの前記アレイと、

ルート・アレイの集合であって、前記ルート・アレイが、前記オブジェクトのアドレスを保持するように用意され、マーカーの前記アレイから選択された所定のマーカーが前記ルート・アレイの集合に関連するような前記ルート・アレイの集合と、

マーカーの前記アレイに含まれるマーカーのステータスの少なくとも一部に基づいて、前記メモリ内のスペースを回収するためのガーベジコレクタと、

を備えるコンピュータシステム。

【請求項２４】　コンピュータシステムに関連するメモリを動的に管理するためのコンピュータプログラム製品であって、

前記コンピュータの第１メモリ部内で第１のガーベジコレクションを実行するためのコンピュータコードと、

前記コンピュータの第２メモリ部上で第２のガーベジコレクションを実行するためのコンピュータコードであって、前記第２メモリ部が、複数のブロックに分割され、前記第２のガーベジコレクションは、前記複数のブロックから選択された所定のブロックに関連するマーカーによって表わされるステータスの少なくとも一部に基づいて、前記所定のブロックが、該所定のブロックに含まれない第２のオブジェクトを参照するところの第１のオブジェクトを含むか否かを判定するコンピュータコードと、

前記コンピュータコードを格納するコンピュータ読み取り可能な媒体と、

を備えることを特徴とするコンピュータプログラム製品。

【請求項２５】　コンピュータシステムの処理装置に前記コンピュータシステムに関連するメモリを動的に管理させるためのコンピュータプログラム製品であって、

前記コンピュータの第１メモリ部内で第１のガーベジコレクションを実行するためのコンピュータコードと、

前記コンピュータの第２メモリ部上で第２のガーベジコレクションを実行するためのコンピュータコードであって、前記第２メモリ部が、複数のブロックに分割され、前記第２のガーベジコレクションは、前記複数のブロックから選択された所定のブロックに関連するマーカーによって表わされるステータスの少なくとも一部に基づいて、前記所定のブロックが、該所定のブロックに含まれない第２のオブジェクトを参照するところの第１のオブジェクトを含むか否かを判定するコンピュータコード

と、
搬送波内に具現化される、前記コンピュータコードを表わすコンピュータデータ信号と、
を備えることを特徴とするコンピュータプログラム製品。

【発明の詳細な説明】

【０００１】

【発明の属する技術分野】本発明は、一般的にいえば、コンピュータシステムにおいて動的に割り付けられるメモリの管理に関する。更に詳しくいえば、本発明は、自動記憶領域回収を局部的に実行可能なように、コンピュータシステムに関連するメモリの異なった部分間におけるリファレンス（参照）を追跡する技術に関する。

【０００２】

【従来の技術】コンピュータシステムに関連するメモリの容量は、普通限られている。このため、メモリの保存と再利用が通常必要となる。ソフトウェア開発者は、種々のコンピュータプログラミング言語を利用して、コンピュータシステム内での動的なメモリ割付を実行することができる。いくつかのプログラミング言語では、先に割り付けられたメモリの領域解放を明示的に行う必要があるが、この操作は複雑でエラーにつながりやすい。明示的な手動でのメモリ管理を必要とする言語には、例えば、Ｃプログラミング言語やＣ＋＋プログラミング言語がある。また、別のプログラミング言語では、自動記憶領域回収技術を利用して、メモリを割り付けるコンピュータプログラムを適正に作動させるためにもはや必要ではないメモリを回収システムから回収する。このような自動記憶領域回収システムでは、先にメモリを使っていたコンピュータプログラムからの明示的な命令やコールなしにメモリの回収が行われる。

【０００３】オブジェクト指向性、即ち、オブジェクトに基づくシステムでは、メモリ割り当ての典型的な単位は、当業者に周知のように、通常、オブジェクトあるいはメモリオブジェクトと称されている。使用中のオブジェクトは、通常、「有効」オブジェクトと称され、一方、コンピュータプログラムを正しく実行するためにもはや必要とされないオブジェクトは、通常、「ガーベジ（ごみ）」オブジェクトと称される。また、ガーベジオブジェクトを回収する動作は、通常、ガーベジコレクション（ごみ集め）と称される。更に、自動記憶領域回収システムを、ガーベジコレクタ（ごみ収集装置）と称する。自動記憶領域回収システムを利用するコンピュータプログラムは、実行中に有効なメモリオブジェクトを変更可能であるということから、ミューテイター（可変誘導装置）と称される。（カリフォルニア州パロアルトのサンマイクロシステムズ社により開発された）Ｊａｖａ（商標）プログラミング言語やＳｍａｌｌｔａｌｋプログラミング言語等の言語で書かれたコンピュータプログラムは、ガーベジコレクションを実行することにより、自動的にメモリの管理を行っている。

【０００４】オブジェクトには、通常、別のオブジェクトへのリファレンスが含まれている。従って、ガーベジコレクタによって管理されるコンピュータメモリの領域には、通常、互いに参照しあうオブジェクトの集合が含まれる。図１は、オブジェクトを含むコンピュータメモリの領域を例示する図である。通常コンピュータシステムに関連するヒープ（かたまり）であるメモリ１０の管理領域にオブジェクト２０が含まれている。一つのオブジェクト２０は、一般に、別のオブジェクト２０によって参照されている。例えば、オブジェクト２０ａは、オブジェクト２０ｂに対するポインタ２４ａを有する。また、オブジェクト２０ｃは、オブジェクト2.0ｂに対するポインタ２４ｂを有する。従って、オブジェクト２０ｂは、オブジェクト２０ａ並びに２０ｃによって参照される。

【０００５】メモリ１０には、多くの外部リファレンスが入力される。図示するように、メモリ１０の外部にある固定ルート３０には、メモリ１０内に位置するオブジェクト２０ａや２０ｃ等のオブジェクトに対するポインタ３４が含まれる。例えばオブジェクト２０ａないし２０ｄのように、固定ルート３０からのリファレンスをたどることによって到達可能なすべてのオブジェクトが有効オブジェクトとみなされる。一方、固定ルート３０からのリファレンスをたどっても到達できないオブジェクト２０ｅは、ガーベジオブジェクトと特徴づけられる。

【０００６】通常、ガーベジコレクタは、オブジェクト２０ｅ等のガーベジオブジェクトを認定するように実現される。一般に、ガーベジコレクタは、多くの異なったアルゴリズムを利用して、処理を実行する。従来用いられているガーベジコレクション用のアルゴリズムとしては参照数計測コレクタ、マーク掃き出しコレクタ、複写コレクタ等が挙げられる。当業者に周知のように、ガーベジコレクションを実行中に、オブジェクト２０が移動した場合には、それに従って、オブジェクト２０へのリファレンスを調整しなければならない。

【０００７】管理されるメモリ領域を小さな部分に分けて、一時に一つの領域で局在的にガーベジコレクションを実行可能なようにする構成が望ましい場合がある。メモリ区分案の一つが、世代ガーベジコレクションである。世代ガーベジコレクションでは、オブジェクトが生成された時点から測定される寿命に基づいて、オブジェクトを分ける。「若い」オブジェクトは、「年寄り」オブジェクトに比べて、ガーベジになる可能性が高いことが知られている。したがって、世代ガーベジコレクションを利用することによって、メモリ回収の全体的な効率を上げることができる。

【０００８】図２は、新世代と旧世代とに区分されるメモリとルートとの間のインターフェースを例示する図である。通常コンピュータシステムに関連するヒープであ

るメモリ１１０には、新世代１１０ａ並びに旧世代１１０ｂが含まれる。固定ルート１１４、即ち、新世代１１０ａと旧世代１１０ｂのいずれかあるいは両方に含まれるオブジェクトを参照する全体的オブジェクトは、図示するように、新世代１１０ａに含まれるオブジェクト１２０に対するポインタ１１６を備える。当業者に周知のように、ルート１１４は、スタック上に位置するものでもよい。

【０００９】新世代１１０ａ内のいくつかのオブジェクト１２０、例えば、オブジェクト１２０ａをルートとみなすこともできる。これは、オブジェクト１２０ａが、有効オブジェクトであると考えられ、他のオブジェクト１２０ｄに対するポインタ１２２を備えるためである。新世代オブジェクト１２６が有効オブジェクトであり、旧世代オブジェクト１２８を参照している場合、旧世代１１０ｂ内で実行されるガーベジコレクションでは、通常、オブジェクト１２８が「回収」されない。一方、新世代オブジェクト１２６が無効オブジェクトの場合、旧世代オブジェクト１２８は他のオブジェクトによって参照されていないため、新世代１１０ａ内で実行されるガーベジコレクションでは、旧世代オブジェクト１２８が到達不能となる。旧世代オブジェクト１２８が到達不能であれば、旧世代１１０ｂで実行されるガーベジコレクションの結果、旧世代オブジェクト１２８の回収が行われる。ここで、新世代オブジェクト１２６と旧世代オブジェクト１２８との間をつなぐポインタ１３０は、新世代１１０ａと旧世代１１０ｂの両方に伸びているため、世代間ポインタとみなされる。ポインタ１３０が新世代オブジェクト１２６から旧世代オブジェクト１２８に伸びている場合、新世代のガーベジコレクションでは旧世代オブジェクト１２８を回収不可能であるため、旧世代オブジェクト１２８は保有ガーベジとみなされる。

【００１０】また、別のメモリ区分案では、一回のガーベジコレクションを実行するために必要な時間を短縮するように、メモリを小さな領域に分けている。ガーベジコレクションに起因する中断は、しばしば、関連するミューテイターの中断につながり、望ましくない。あるシステムでは、ガーベジコレクタに充分小さい最大許容中断期間が設定されている。このようなガーベジコレクタは、実時間ガーベジコレクタとして知られている。また、別のシステムでは、中断時間を短くするようにガーベジコレクタが働くが、所定の状況下ではこの試みが失敗に終わることもある。中断時間を短くするように働くガーベジコレクタは、非中断あるいは増分ガーベジコレクタとして知られている。

【００１１】個々のメモリ領域上で処理を実行するためには、ガーベジコレクタが、その領域内に伸びるすべてのリファレンスに関する知識を持っている必要がある。領域内に伸びるリファレンスは、その領域に対するルートと称される。ここで、ルートには、固定ルートのような外部リファレンスと、コンピュータメモリの他の領域からのリファレンスと、の両方が含まれる。したがって、ガーベジコレクタは、通常、ルート、即ち、リファレンスを見つけて、追跡するためのメカニズムを備える。

【００１２】メモリ領域内でリファレンスの位置決めを行うために可能な方法の一つは、メモリ内のすべてのオブジェクトを走査する方法である。しかし、大部分のシステムでは、メモリ内のすべてのオブジェクトを走査する方法は、時間がかかるため好ましくない。したがって、もっと効率的な追跡案が求められている。

【００１３】ミューテイターがオブジェクトにリファレンスを記憶させると、ガーベジコレクション（ごみ集め）を目的としてリファレンスを追跡するように追加処理が実行される。この追加処理では、バリア（障壁）の書き込み、即ち、チェックの記憶が行われる。ミューテイターの効率を許容可能なレベルに維持するために、バリアの書き込みに関連するコストをできるだけ低く押さえる必要がある。

【００１４】メモリ領域内でリファレンスを追跡するための方法の一つは、その領域に対するすべてのルートを保有する集合を保持する方法である。このような集合は、一般に、その領域に対する記憶集合として知られている。関連するバリアの書き込みにより、ある領域へのリファレンスが記憶された時を検出することができる。したがって、バリアの書き込みにより、所定の領域に関連する記憶集合内でのリファレンスの位置が挿入される。

【００１５】図３は、新世代に含まれるオブジェクトと旧世代に含まれるオブジェクトとをつなぐポインタで、記憶集合を利用して追跡されるポインタを例示する図である。メモリ３０２は、新世代３０２ａと旧世代３０２ｂとに分割される。記憶集合３０４を用いて、旧世代オブジェクト３１０から新世代オブジェクト３１２に伸びるポインタ３１４を追跡する。旧世代オブジェクト３１０ａには新世代オブジェクト３１２ｂに対するポインタ３１４ａが含まれるので、旧世代オブジェクト３１０ａのアドレスは、記憶集合３０４に格納される。同様に、新世代オブジェクト３１２ｂと３１２ａに対するポインタ３１４ｂ及び３１４ｃを含む旧世代オブジェクト３１０ｂのアドレスも、記憶集合３０４に格納される。

【００１６】記憶集合にはルートの全てが含まれているため、記憶集合を用いればガーベジコレクションを目的としたルートの位置決めが確実に実行される。ただし、バリアの書き込みを利用する方法は、余分のメモリを必要とするため、高くつく場合がある。また、新しい位置が記憶集合に挿入された場合、その位置が記憶集合内にすでに存在している可能性もある。ある位置を挿入する前に記憶集合にその位置がすでに存在していないかどうかをチェックする方法は、高くつく。その一方で、ある

位置が重複していないかどうかのチェックを省けば、記憶集合が不必要に大きくなってしまう可能性がある。当業者に周知のように、一般に、記憶集合が保有できる重複の数には上限がない。所定の位置に対するリファレンスを格納する時に、その位置が、すでに、先のリファレンスで参照されている場合がある。この場合、格納操作に先立って実行された所定の位置に関係する記憶集合への入力は、後で行われる格納操作によって不必要になる。前の入力を解除する処理は、状況によって、費用のかかる操作となるが、その一方、前の入力をそのまま放置しておけば、記憶集合が余分のメモリを占有することにつながる。

【００１７】メモリ領域内でリファレンスを追跡するために用いられる別の案にカードマーキング法がある。一般に、カードマーキング法では、カードと呼ばれる比較的小さな部分にメモリを概念的に分割する。ガーベジコレクタは、カード一枚ごとに一つの入力となるように、ビット・アレイ（列）の割り当てを行う。リファレンスが格納されると、バリアの書き込みを実行することにより、対応するカード・アレイの入力を算出して、関連ビットを設定する。この処理は、カードの「汚染」と呼ばれている。ここで、効率を考えて、ビット・アレイの代りにバイト・アレイやワード・アレイを用いることもできる。

【００１８】カードマーキングを用いる利点の一つは、バリアの書き込みが比較的安価であることである。また、カードマーキングの別の利点は、カードアレイに必要なメモリ容量が一定であることである。ただし、ガーベジコレクションの実行時にルートを位置決めするために必要な処理が複雑で、記憶集合を用いたシステムに比べてより多くの処理を必要とする場合がある。この方法では、ガーベジコレクタは、リファレンスの格納が行われた大体の場所を知っているだけである。即ち、ガーベジコレクタは、カードマーキング・アレイの汚染入力があった場所を知っているだけである。したがって、汚染入力が認定されると、対応するカードを走査してルートを探す必要がある。ルートを見つけるためにカードを走査する方法は、メモリ全体を走査するよりもずっと安価であるが、カードの走査は、それでも、費用のかかる方法である。当業者に周知のように、ガーベジコレクタがルートを位置決めすると、次回のガーベジコレクションでルートの位置決めを実行するために、対応するカードアレイの入力を汚染状態のまま保持する必要がある。

【００１９】また、記憶集合とカードマーキングの両方を用いる合成案とすることもできる。バリアの書き込みにより、上述したようなカードマーキングを実行する。ただし、この方法では、ガーベジコレクションの実行時に、ガーベジコレクタがカードごとに記憶集合を作成する。ガーベジコレクションが完了すると、カードマーキング・アレイがクリアされる。記憶集合とカードマーキングの合成案を用いることにより、後に続くガーベジコレクションのために必要な走査量を削減することができ、その結果、ガーベジコレクション処理の全体的な効率を上げることができる。ただし、このような案の実行は、複雑である場合が多い。このため、記憶集合とカードマーキングの合成案を効率よく実現する方法並びに装置が求められていた。

【００２０】

【課題を解決するための手段およびその作用・効果】本発明は、コンピュータメモリ内で世代ガーベジコレクションを実行するための方法並びに装置に関する。本発明の方法は、第１メモリ部と、関連マーカーを各々有する複数のブロックに分割される第２メモリ部と、を含むメモリを、動的に管理するためのにコンピュータ実現方法であり、第１メモリ部上で、第１のガーベジコレクションを実行する工程を備えることを要旨とする。また、本発明の方法は、第２メモリ部の複数のブロックのうちの所定のブロック上で、第２のガーベジコレクションを実行する工程を備える。さらに、第２メモリ部の所定のブロック上で、第３のガーベジコレクションを実行する。第３のガーベジコレクションは、所定のブロックに関連するマーカーによって表わされるステータスの区少なくとも一部に基づいて、所定のブロックが、その所定のブロック内に含まれていない第２のオブジェクトを参照するところの第１のオブジェクトを含むか否かの判定を含む。ステータスは、第２のガーベジコレクションの実行後に第２のオブジェクトへのリファレンスが記憶されたか否かの表示を含む。第２のガーベジコレクションの実行後に第２のオブジェクトへのリファレンスが記憶された場合には、所定のマーカーを用いて、新たなルート・アレイが生成される。

【００２１】本発明の別の方法は、コンピュータメモリ内で所定のオブジェクトを割り当てるためのコンピュータ実現方法であって、メモリの第１部分が、所定のオブジェクトを割り当てるのに適しているかどうかを判定する工程と、第１部分が所定のオブジェクトを割り当てるのに適していると判定された場合に、所定のオブジェクトを割り当てる工程と、を備えることを要旨とする。また、上記方法は、第１部分が所定のオブジェクトを割り当てるのに適していないと判定された場合には、第１部分でガーベジコレクションを実行する工程を含む。第１部分でガーベジコレクションを実行する工程は、所定のワードに関連する第１ルートがメモリ内にすでに存在するオブジェクトを参照することを示すように配置された所定のワードの位置決めを行うように、ワードのアレイを走査する工程を含む。

【００２２】更に、本発明のコンピュータシステムは、第１メモリ部と、複数のブロックに分割される第２メモリ部と、して用意されたメモリを含むことを要旨とする。本発明のコンピュータシステムは、更に、メモリに

接続されるプロセッサと、第１メモリ部に関連する第１ガーベジコレクタを含む。第２メモリ部に関連する第２ガーベジコレクタは、所定のブロックがその所定のブロックに含まれていない第２のオブジェクトを参照する第１のオブジェクトを含むか否かを示すように配置された関連マーカーを有する所定のブロック上でガーベジコレクションを実行するように構成される。所定のマーカーは、所定のブロックに含まれていない第２のオブジェクトを所定のオブジェクトが参照する場合に、そのオブジェクトのアドレスを保持するルート・アレイに関連する。１つの実施例では、第２ガーベジコレクタは、マーカーを用いて、第１メモリ部内に第２のオブジェクトが含まれるか否かを認定するように、構成される。

【００２３】本発明の上記並びに他の利点は、以下の詳細な説明を読み、図面を研究することによって明らかになるであろう。

【００２４】

【発明の実施の形態】本発明並びにその更なる利点は、添付する図面とともに以下の説明を参照することにより、理解されるであろう。

【００２５】ガーベジコレクションは、コンピュータプログラムによって用いられるコンピュータメモリの動的な割り当てを行うものである。一般に、ガーベジコレクションは、プログラムの実行を中断させる。ガーベジコレクションに関連する中断時間を短くするために提案された装置では、メモリが複数の世代に分割されている。例えば、二世代メモリ構造において、メモリを、新たに割り当てられたオブジェクトを含む新世代と、古いオブジェクトを含む旧世代と、に分割するようにしてもよい。ここで、新たに割り当てられたオブジェクトは、古いオブジェクトよりも早く無効になる可能性が高い。したがって、ガーベジコレクションは、旧世代でよりも新世代で頻繁に実行される。通常、メモリ全体の大きさに比べて、新世代はかなり小さい。したがって、プログラムの実行中に実質的な中断を引き起こすことなく、新世代におけるガーベジコレクションを行うことができる。

【００２６】新世代におけるガーベジコレクションが有意な中断を引き起こさない一方、旧世代におけるガーベジコレクションはプログラムの実行中に有意の中断を引き起こす。これは、旧世代が、通常、新世代よりも大きいことに起因する。更に、旧世代に含まれるオブジェクトから新世代に含まれるオブジェクトに伸びる世代間ポインタが存在する場合には、プログラムの実行中に、世代間ポインタの追跡が行われる。このようなポインタに関連する旧世代のオブジェクトは、新世代のルートであると考えられるため、世代間ポインタの追跡が行われる。旧世代に含まれるオブジェクトから新世代に含まれるオブジェクトへのポインタ、即ち、リファレンスの追跡は、複雑で、時間がかかることが多い。

【００２７】旧世代のメモリを小さな領域、即ち、ブロックに分割することによって、旧世代のガーベジコレクションに関連する中断時間を減らすことができる。また、旧世代ガーベジコレクションを、毎回、旧世代メモリの所定のブロック内で実行するようにしてもよい。旧世代ガーベジコレクションが実行されるブロックを制限し、かつ、旧世代ガーベジコレクションが実行されるたびに異なったブロックでガーベジを回収するようにすれば、旧世代ガーベジコレクションの効率を増大させることができる。

【００２８】前述したように、旧世代メモリは、旧世代ガーベジコレクションを容易にするように、ブロックに分割される。旧世代ガーベジコレクションは、毎回、任意の適当なブロック上で実行される。即ち、旧世代ガーベジコレクションを漸増方向で実行するようにしてもよい。例えば、ガーベジコレクションがまだ行われていないブロックのうち最も古いブロックでガーベジコレクションを実行するようにしてもよい。あるいは、ガーベジコレクションが既に行われたブロックのうち一番先に行われたブロックでガーベジコレクションを実行するようにしてもよい。図４を参照して、旧世代におけるメモリのブロックへの分割を、本発明の一実施例にしたがって説明する。旧世代４０４は、メモリのブロック４０８を含む。メモリのブロックは、通常、必要に応じて割り当てられる。即ち、実質的にすべての既存ブロック４０８が一杯になると、追加ブロックの割り当てが行われる。所定のプログラムに関連するオブジェクトを含むブロック４０８は、「カー」とも称される。ブロック、即ち、カー４０８は、「トレイン」４１２と称される連結された集合として配置される。例えば、トレイン４１２ａは、カー４０８ａ及び４０８ｂを、トレイン４１２ｂは、カー４０８ｃ、４０８ｄ、４０８ｅを、また、トレイン４１２ｃは、カー４０８ｆ及び４０８ｇを含む。

【００２９】トレイン４１２を構成するカー４０８は、一般に、所定のカー４０８が所定のトレイン４１２に加えられた時に基づく順に並べられる。例えば、トレイン４１２ａにおいて、カー４０８ｂがカー４０８ａの後でトレイン４１２ａに加えられた場合、カー４０８ａは、カー４０８ｂと同じトレインの低位のカーと考えられる。同様に、トレイン４１２は、所定のトレイン４１２が形成された時に基づく順に並べられる。図示するように、トレイン４１２ｂがトレイン４１２ｃの後でメモリ４０４に加えられた場合、トレイン４１２ｃは、トレイン４１２ｂに対して下位のトレインであり、その結果、トレイン４１２ｂ内のカー４０８ｃ、４０８ｄ、４０８ｅに対して下位のトレインになる。

【００３０】トレイン４１２を用いて、旧世代４０４内でガーベジコレクションを実行するアルゴリズムは、通常、一時に、所定の数のカー４０８を回収する。実施例では、各回の旧世代ガーベジコレクションの間に、たった一つのカー４０８のみが回収される。ただし、各回の

旧世代ガーベジコレクションの間に回収されるカーの数はこれに限定されるものではなく、任意の適当な数を回収することができる。一時に一つのカー４０８のみを回収することによって、旧世代ガーベジコレクションの全体的な長さ、すなわち、旧世代ガーベジコレクションに関連する中断時間が基本的に制限される。このように、各回の旧世代ガーベジコレクションの実行中に所定数のカー４０８のみを回収することによって、旧世代ガーベジコレクションに通常関連する長い中断時間を削減することができる。

【００３１】一般に、カー４０８でガーベジコレクションを実行する場合、旧世代メモリ内の各カー４０８を起点とする、あるいは、各カー４０８内のオブジェクトにアクセスするすべてのポインタの追跡が行われる。ポインタを追跡する方法を図５を参照して以下に説明する。回収すべき所定のカー４０８が有効オブジェクトを含む場合、そのオブジェクトを指し示す、あるいは、そのオブジェクトによって指し示されるトレイン４１２内にそのオブジェクトを複製する。オブジェクトの複製が完了すると、「もとの」オブジェクトが回収される。所定のトレイン４１２が外部に通じるポインタをまったく持たない場合、そのトレイン４１２は消去可能である。すなわち、所定のトレイン４１２に割り当てられたメモリが解放される。同様に、所定のカー４０８が外部に通じるポインタをまったく持たない場合、そのカー４０８は消去可能である。

【００３２】実施例において、所定のトレイン４１２内のカー４０８の大きさは一定である。即ち、すべてのカー４０８が実質的に同じ大きさである。一つのカー４０８がリンクしたオブジェクトを収容するのに充分な領域を有していない場合、一つのカー４０８、例えばカー４０８ｆ内のオブジェクト４１６ａを第２のカー４０８、例えばカー４０８ｇ内のオブジェクト４１６ｂにリンクさせるようにしてもよい。オブジェクト４１６ａ及び４１６ｂは異なったカー４０８内に存在し、互いに参照しあっているため、旧世代ガーベジコレクションの実行中、オブジェクト４１６ａ及び４１６ｂは有効であり続ける可能性が高い。このように、旧世代ガーベジコレクションを実行してもカー４０８ｆ及び４０８ｇが回収されない結果となる場合もある。トレイン４１２ｃ内部でカー４０８ｆと４０８ｇとを結ぶポインタが追跡されない場合、カー４０８ｆ及び４０８ｇに関連するメモリは、通常解放されない。

【００３３】一般的にいって、トレイン４１２の長さ、並びに、カー４０８の大きさは様々に変更可能である。カー４０８の大きさは、これらに限定されるものではないが、旧世代４０４の大きさ、ガーベジコレクションアルゴリズムの速度、およびガーベジコレクションアルゴリズムを実行するコンピュータの速度等の要因に依存する。例えば、現在のシステムで良好に作動するカーの大きさは、約２０キロバイトのメモリサイズから約１００キロバイトのメモリサイズまでである。実施例では、カー４０８のメモリサイズは約６４キロバイトである。

【００３４】カー４０８は更にカード４２０に分割することが可能である。カード４２０を用いることによって、カー４０８上で実行される旧世代ガーベジコレクションを容易にすることができる。これに関しては、図５を参照して後述する。カー４０８と同様に、カード４２０も任意のサイズを持つことができる。ただし、カード４２０のサイズは、通常、約１００ないし１０００バイトである。例えば、カー４０８が約６４キロバイトのメモリサイズを有する場合、カード４２０が約５１２バイトのサイズを持つようにしてもよい。

【００３５】旧世代内の異なった領域に関係する記憶、即ち、マーカーを準備することによって、旧世代オブジェクトから新世代オブジェクトにつながる世代間ポインタの追跡効率を向上させることができる。例えば、マーカーは、所定の領域の関連部分が新世代内のオブジェクトに対するポインタを含んでいるか否かを示すように設定されるフラグを含むワードである。このようなワードを用いることによって、旧世代内のオブジェクトから新世代内のオブジェクトへの世代間ポインタの追跡を効率よく行うことができる。ここでマーカーの例としてワードを挙げたが、マーカーは、ビット、バイト等、任意の適当な記憶形態であればよい。

【００３６】旧世代メモリ内のカードに関連するオブジェクトから新世代メモリ内のオブジェクトにつながる世代間ポインタを追跡するために、カードが「追跡構造」を備えるようにしてもよい。追跡構造、即ち、カードマークを用いることによって、あるカードに関して世代間ポインタが存在しているか否かを認定し、また、そのカード内部のいずれのオブジェクトがポインタを含んでいるかを認定することができる。図５は、本発明の一実施例にしたがって、カードマーク・アレイと関連するルート・アレイのプールとを例示する図である。ルート・アレイは、通常、あるカードに対するオフセットとして指定されるルート位置を含む小さなアレイである。言い換えると、ルート・アレイは、基本的に、小さな記憶集合である。カードマーク４５２のアレイ４５０は、ルート・アレイ４６０のプール４６４に含まれるルート・アレイ４６０に対するポインタ４５６を含む。カードマーク４５２は、通常、トレイン内部のカーに関連する。更に詳しく言えば、トレイン内部のカーを、旧世代オブジェクトを保持する多数のカードに分割することができる。このように、トレイン内部のカーは、多くのカードマーク４５２に関連づけられる。あるカーに関係するすべてのカードマーク４５２を含む場合でも含まない場合でも、カードマーク４５２のグループがカードマーク４５２のアレイ４５０であると考えられる。実施例では、旧世代に関連するすべてのカードマーク４５２がアレイ４

５０に含まれる。

【００３７】実施例では、例えばカードマーク４５２ａ等のカードマーク４５２は、３２ビットのワードである。ただし、一般に、カードマーク４５２ａは、任意の適当な長さのワードであればよい。あるいは、カードマークを構成するデータ構造を多数の成分に分割してもよい。カードマーク４５２ａを構成するビットを所定の適用に適した任意の方法で割り当てることができるが、例えば、カードマーク４５２ａの最下位ビットＬＳＢをカードマーク４５２ａの「状態」、即ち、全体的な条件を基本的に認定するフラグとして用いる。カードマーク４５２ａの最下位ビット４６８は「汚染」フラグである。即ち、最下位ビット４６８は、一般に、カードマーク４５２ａが、より詳しく言えば、カードマーク４５２ａに関連する（図４に示すような）カードが「汚染されている」か否かを示すように構成される。ここで、汚染カードは、前回ガーベジコレクションを実行して以来ポインタが格納されているカードである。このようなポインタには、限定されるものではないが、旧世代メモリから新世代メモリにつながる世代間ポインタ、下位トレインに対するポインタ、カードマーク４５２ａに関連する同一トレイン内の下位のカーに対するポインタが含まれる。最下位ビット４６８が設定されると、即ち、最下位ビット４６８が「０」に設定されると、カードマーク４５２ａが汚染されていることが示される。

【００３８】カードマーク４５２ａの最下位から二番目のビット４７０は、新世代フラグであり、カードマーク４５２ａが新世代に対する世代間ポインタを含むか否かを示すために用いられる。最下位から二番目のビット４７０が設定されると、即ち、「０」に設定されると、カードマーク４５２ａが新世代に対する世代間ポインタを含むことが示される。最下位から三番目のビット４７２は、実施例において、下位トレインフラグである。下位トレインフラグは、カードマーク４５２ａが下位トレインに対するポインタを有するか否かを示すように構成される。下位トレインフラグ、即ち、最下位から三番目のビット４７２が設定されると、カードマーク４５２ａが下位トレインに対するポインタを含むことが示される。最下位から四番目のビット４７４は、カードマーク４５２ａが同じトレイン内のより下位のカーに対するポインタを含むか否かを示すように構成される同一トレインフラグである。

【００３９】実施例では、カードマーク４５２ａがクリーンであると考えられる場合、カードマーク４５２ａは、通常、旧世代から新世代につながるポインタ、下位トレインに対するポインタ、あるいは、同一トレイン内のより下位のカーに対するポインタを含まない。このように、カードマーク４５２ａがクリーンな場合、最下位ビット４６８、最下位から二番目のビット４７０、最下位から三番目のビット４７２、ならびに、最下位から四番目のビット４７４は、すべて値「１」に設定されている。言い換えると、カードマーク４５２ａがクリーンである場合には、カードマーク４５２ａの最下位４ビットがクリアされている。したがって、図示するように、カードマーク４５２ａ及び４５２ｂはクリーンであり、最下位ビットが設定されたカードマーク４５２ｃは汚染されている。

【００４０】カードマーク４５２ａに含まれる残り２８個のビットを、カードマーク４５２ａに関連するポインタのアドレスを基本的に保持する関連ルート・アレイ４６０を示すポインタとして利用されるように割り当ててもよい。あるいは、例えば、実施例のように、カードマーク４５２ａが２７ビットのポインタ４７８と予備ビット４８０を含むようにしてもよい。２７ビットのポインタ４７８は、カードマーク４５２ａからルート・アレイ４６０ａにつながるポインタ４５６ａを認定する。ルート・アレイ４６０ａは、８ワードあるいは１６ワードで構成されていることが多い。ただし、ルート・アレイ４６０ａを構成するワードの数は様々に変更可能である。ルート・アレイ４６０は、通常、ルートに対するリファレンスを保持するように構成される。例えば、ルート・アレイ４６０ａは、カードマーク４５０ａに関連するルート、したがって、カードマーク４５０ａに関連する（図４に示すような）カードを保持する。

【００４１】適当なルート・アレイ４６０がいっぱいの場合、「ルート・アレイのオーバーフロー」が起こると考えられる。所定のルート・アレイ４６０に格納すべきルートが過剰に多い場合、もはやルートの追跡を行うことができない。プール４６４内のルート・アレイ４６０に対するポインタの容量が、プール４６４内で割り当てられた利用可能なルート・アレイ４６０に対して過剰な場合、ルート・アレイのオーバーフローが起こる。この結果、ガーベジコレクションを実行すると、ルート・アレイのオーバーフローに関係するカード内のポインタが検索されて、ルートの認定が行われる。ルート・アレイのオーバーフローが起こると、２７ビットのポインタ４７８が零に設定される。即ち、２７ビットのポインタ４７８に含まれる２７個のビットが「０」に設定される。

【００４２】ガーベジコレクション処理に直接関係する、あるいは、直接関係しない任意の数の適当な目的のために予備ビット４８０を用いることができる。ここで、適当な目的とは、以下に限定されるものではないが、例えば、予備ビット４８０を用いてカードマーク４５２ａの年齢（経過期間）を示すものである。また、カードマーク４５２ａに含まれるポインタ、例えば、２７ビットのポインタ４７８に関連するビットの数を減らすことによって、追加の予備ビットがカードマーク４５２ａに含まれるようにしてもよい。

【００４３】カードマークは、新世代に含まれるオブジェクトに対する世代間ポインタを含むカー内のカードを

追跡するように、ガーベジコレクション処理に関連して用いられる。例えば、コンピュータプログラムの実行中、カードマークが実質的に現在処理中のカードマークとして維持されるようにカードマークを更新するようにしてもよい。その後のガーベジコレクションの実行中、世代間ポインタを有するカードを認定するように、カードマークがチェックされる。

【００４４】コンピュータプログラムの実行中にガーベジコレクション処理を容易に行うためにカードマークを用いる場合、通常、カードマークによって参照されるオブジェクトを認定するように、カードマークが検索され、かつ、更新される。次に、図６を参照して、本発明の一実施例にしたがって、ガーベジコレクション処理を利用するプログラムを実行するためのステップを説明する。所定のプログラムを実行する前に、ステップ５０２で、そのプログラムに関係するカードアレイを初期化する。例えば、所定のカーに関係するカードアレイには、図５を用いて上述したように、プログラムによって利用されるオブジェクトに関係するカードマーク、あるいは、カードマーグに対するリファレンスが含まれる。このように、一般に、カード・アレイは、プログラム内で利用されるオブジェクトを追跡するために用いられる。カード・アレイが初期化された後、オブジェクトを割り当てること、あるいは、オブジェクトに関するポインタを格納することが必要になるまで、ステップ５０３でプログラムを実行する。オブジェクトを割り当てるために、通常、メモリをオブジェクトに割り当てる処理が行われ、また、オブジェクトに関するポインタを格納するために、他のオブジェクトに対するポインタを第１オブジェクト内に格納する処理が実行される。

【００４５】プログラムの実行中、ポインタを格納するための命令が定期的に与えられる。ステップ５０４で、あるポインタを格納するべきと判定された場合、ステップ５１２で、ポインタを格納すべきオブジェクトに対応するカード・アレイの入力が認定される。カード・アレイの入力が認定されると、ステップ５１４で、そのカード・アレイの入力は「汚染されている」とマークされる。カード・アレイの入力、即ち、カードマークが汚染されていることをマークするために、図５を用いて上述したように、入力の汚染フラグ、即ち、入力４５２ａの最下位ビット４６８を設定する処理が行われる。カードマークが汚染されているとマークされた後、ステップ５１６で任意の適当な方法を用いてポインタが格納される。ポインタが書き込まれると、処理がステップ５０３に戻って、プログラムの実行が続けられる。プログラムが終了すると、ステップ５０２でカードマーク・アレイが初期化され、プログラムの再実行が開始される。

【００４６】また、オブジェクトを割り当てるための命令も実行中に与えられる。例えば、ステップ５０４に戻って、オブジェクトを割り当てる必要がある場合、ステップ５０６で、割り当てられるべきオブジェクトに対して充分な新世代メモリが存在しているか否かの判定が行われる。ステップ５０６でオブジェクトの割り当てに利用される充分な新世代メモリがあると判定された場合には、ステップ５０８でオブジェクトの割り当てが行われ、処理がステップ５０３に戻って、格納すべきポインタが存在するか否かの判定が行われる。

【００４７】逆に、ステップ５０６で割り当てられるべきオブジェクトに対して充分な新世代メモリがないと判定された場合には、処理は、ステップ５１０に進んで、ガーベジコレクションが実行される。ガーベジコレクションの実行中、新世代メモリを、また、おそらくは旧世代メモリも、クリーンにして、オブジェクトが割り当て可能なように新世代メモリの一部を解放する。任意の適当な方法でガーベジコレクションを実行することができるが、以下に、図７を参照して、特に好適なガーベジコレクションの方法を説明する。ステップ５１０でガーベジコレクションを実行した後、処理は５０６に戻って、割り当てられるべき所定のオブジェクトに対して、即ち、ステップ５０３で割り当てが必要であると考えられたオブジェクトに対して、充分な新世代メモリがガーベジコレクションで準備されているか否かを判定する。

【００４８】図７を参照して、本発明の一実施例にしたがって、ガーベジコレクションの実行に関係するステップを説明する。すなわち、図６のステップ５１０を詳述する。ガーベジコレクションは、オブジェクトの割り当てが可能になるように充分なメモリ領域を「解放する」ために、新世代メモリと旧世代メモリの両方で実行可能である。ガーベジコレクションが実行されるシステムがマルチスレッドシステムである場合には、任意の適当な方法を用いて、ステップ６０２でスレッドを同期化させる。同期化が必要なスレッドが同期化されると、ステップ６０４で、新世代メモリ内でガーベジコレクションが実行される。図８を参照して、新世代ガーベジコレクションを実行する方法に関するステップを後述する。

【００４９】ステップ６０４で新世代ガーベジコレクションを実行した後、処理はステップ６０６に進み、旧世代メモリに関するガーベジコレクションを実行する必要があるか否かの判定が行われる。実施例では、旧世代ガーベジコレクションが定期的に実行される。即ち、所定の時間が経過した後、旧世代ガーベジコレクションを実行する。ただし、旧世代ガーベジコレクションが必要か否かの判定に、他の、あるいは、追加の基準を用いることもできる。

【００５０】旧世代ガーベジコレクションが必要であると判定された場合、ステップ６０８で、カードマーキング案を用いて旧世代ガーベジコレクションを実行する。カードマーキング案を用いて旧世代メモリ上で実行されるガーベジコレクションには様々な方法を適用可能であるが、図１４及び図１５を参照して、適切な旧世代ガー

ベジコレクション方法の一つを後述する。

【００５１】ステップ６０８で旧世代ガーベジコレクションが完了すると、オブジェクトの割り当てを可能にするために実行されるガーベジコレクションの全体的な処理が完了する。即ち、処理は、図６のステップ５０６に進み、割り当てられるべきオブジェクトに対して充分な新世代メモリが利用可能であるか否かの判定が行われる。同様に、ステップ６０６で旧世代ガーベジコレクションが必要でないと判定された場合にも、処理は、図６のステップ５０６に進む。

【００５２】図８は、本発明の一実施例にしたがって、新世代ガーベジコレクション処理に関するステップ、即ち、図７のステップ６０４の詳細を示すフローチャートである。まず、ステップ７０１で、固定ルートの追跡が行われる。前述したように、固定ルートは、ガーベジコレクションによってクリーンにされている新世代メモリあるいは旧世代メモリ内を直接指し示すルート、例えば、スタック上の有効オブジェクトである。固定ルートの追跡は、通常、ルートのリファレンスの推移的な追跡を伴う。固定ルートあるいはその他のルートの追跡に関係する実際のステップに関しては、図９ないし図１２を参照して、後述する。

【００５３】固定ルートの追跡後、ステップ７０２でカードアレイを走査して、設定された汚染フラグおよび新世代フラグのいずれかあるいは両方を有するカード・アレイ内の次の入力の位置決めを行う。上述したように、例えば、あるビットを「設定する」とは、値「０」をそのビットに割り当てることを意味し、また、あるビットを「クリアする」とは、値「１」をそのビットに割り当てることを意味する。次に、ステップ７０３で、設定された新世代フラグおよび汚染フラグのいずれかあるいは両方を有する入力、即ち、カードマークが見つかったか否かが判定される。このような入力が見つかった場合には、処理がステップ７０４に進み、その入力が汚染されているか否かの判定が行われる。

【００５４】ステップ７０４で入力が汚染されていると判定された場合には、ステップ７０７でその入力に関連するカードがクリーンであるとマークする。ここで、カードがクリーンであるとマークするとは、そのカードに関係するカードマークがクリーンであるとマークすることを意味する。ステップ７０７でカードがクリーンであるとマークした後、処理はステップ７０８に進み、そのカードに含まれるすべてのオブジェクトを走査して、次に追跡されるルートの位置決めを行う。上述したように、ルートの追跡に関係するステップに関しては、図９ないし図１２を参照して、後述する。ルートの追跡が実行されると、処理は、ステップ７０２に戻り、設定された汚染フラグおよび新世代フラグのいずれかあるいは両方を有する次の入力、即ち、カードマークの位置決めを行うために、カード・アレイを走査する。

【００５５】ステップ７０４で入力が汚染されていないと判定された場合には、その入力は、設定された新世代フラグを有している。言い換えると、その入力には、世代間ポインタが含まれている。入力が汚染されていなければ、処理がステップ７０４からステップ７０６に進み、その入力に関係するルート・アレイがオーバーフローしたか否かが判定される。オーバーフローしたルート・アレイとは、追加ルートの挿入を受け入れるのに充分な領域を含んでいないルート・アレイを意味する。ある入力に関係するルート・アレイがオーバーフロー状態であると判定された場合には、処理がステップ７０７に進み、その入力に関係するカードがクリーンであるとマークされる。

【００５６】処理はステップ７１４からステップ７１８に進み、入力に関係するブロックが走査され、そのブロックに関係するルートが追跡される。次に、処理はステップ７０２に戻り、カード・アレイの走査を実行して、カード・アレイ内でゼロに設定された最下位ビットを有する次の入力の検索を行う。

【００５７】ステップ７０３で、適当な入力、即ち、ゼロに設定された最下位ビットを有する入力が見つからない場合には、ステップ７１０で、すべての複製されたオブジェクトの走査が完了するまで、新世代メモリ内でルートの追跡が行われる。すべての複製されたオブジェクトの走査が完了すると、新世代ガーベジコレクション処理が完了する。

【００５８】一般に、ガーベジコレクションには、上述したように、ルートの追跡処理が含まれる。次に、図９を参照して、本発明の一実施例にしたがって、一つのルートを追跡する処理に関係するステップを詳述する。処理が開始されると、まず、ステップ７２０で、ガーベジコレクションが実行されているメモリ領域内をルートが指し示しているか否かが判定される。ルートがガーベジの回収が行われている領域内を指し示していないと判定された場合には、ルートを追跡する処理を終了する。一方、ステップ７２０で、ルートがガーベジコレクションが実行されている領域内を実際に指し示していると判定された場合には、次に、ステップ７２１で、カードマークのヘッダ領域が前進ポインタを保持しているか否かの判定が行われる。即ち、カードマークに関係する前進ポインタによって新しいメモリ位置が認定されるか否かが判定される。

【００５９】ヘッダ領域が前進ポインタを保持していると判定されると、処理は、ステップ７２１からステップ７２２に移り、前進カウンタによって認定された新しい位置にルートを更新する。ルートが更新されると、それにしたがって、ステップ７２８でカードマークが更新される。カードマークの更新処理に関するステップに関しては、図１０を参照して、後述する。カードマークを更新後、ルートの追跡処理を終了する。

【００６０】ステップ７２１でヘッダ領域が前進ポインタを保持していないと判定された場合には、ステップ７２４で、そのルートによって認定されたオブジェクトを新しい位置に複製して、オブジェクトのヘッダに前進ポインタを挿入する。前進ポインタは、オブジェクトの新しい位置を認定する。前進ポインタをヘッダ内に挿入した後、ステップ７２６で、そのルートを新しい位置に更新する。次に、ステップ７２８で、関連するカードマークを更新して、ルートの追跡処理を終了する。

【００６１】次に、本発明の一実施例にしたがって、図１０ないし図１２を参照して、カードマークの更新処理に関するステップ、即ち、図９のステップ７２８を詳述する。まず、ステップ７４０で、ポインタが旧世代から新世代につながっているか否かの判定が行われる。ポインタが旧世代から新世代につながっている場合には、次に、ステップ７４６で、旧世代から新世代へのポインタが存在することを示す新世代フラグが設定されているか否かが判定される。

【００６２】新世代フラグが設定されているとステップ７４６で判定された場合、次のステップ７５２で、ルート・アレイがオーバーフローしたか否かが判定される。ルート・アレイがオーバーフローしている場合には、カードマークを更新する処理を完了する。一方、ルート・アレイがオーバーフローしていない場合には、ステップ７５４で、ルート・アレイがいっぱいか否かが判定される。ルート・アレイがいっぱいではないと判定されると、処理がステップ７５０に進み、ルート、即ち、現在追跡されているルートが、そのルート・アレイに挿入され、その後、カードマークを更新する処理を完了する。一方、ステップ７５４で、ルート・アレイがいっぱいであると判定されると、処理は、ステップ７５５に進み、ルート・アレイのオーバーフローを示すように、カードマークが設定される。カードマークを設定した後、カードマークの更新処理を完了する。

【００６３】一方、ステップ７４６で新世代ポインタが設定されていないと判定された場合、ステップ７４７で、ポインタが旧世代から新世代につながっていることを示す新世代ポインタを設定する。次に、ステップ７４８で、ルート・アレイを割り当てて、割り当てられたルート・アレイを指し示すようにカードマークを設定する。処理は、ステップ７４８からステップ７４９移り、ルート・アレイの割り当てに成功したか否かが判定される。ルート・アレイの割り当てが成功した場合には、ステップ７５０で、そのルート・アレイに追跡されたルートを挿入する。一方、ルート・アレイの割り当てが成功しなかった場合には、処理はステップ７５５に移り、そのルート・アレイがオーバーフローしていることを示すようにカードマークを設定する。例えば、ルート・アレイがオーバーフローしていることを示すようにカードマークを設定する処理は、カードマークに含まれるポインタ、即ち、２７ビットのポインタを零に設定することにより実現される。

【００６４】ステップ７４０でポインタが旧世代から新世代につながっていないと判定された場合、処理はステップ７４２に進み、旧世代内の下位のトレインを指し示すポインタが存在するか否かが判定される。ポインタが旧世代内の下位のトレインを指し示していると判定された場合、次に、ステップ７６０で、旧世代から新世代へのポインタが存在していることを示す新世代フラグが設定されているか否かの判定が行われる。新世代フラグが設定されている場合、処理はステップ７７５に進み、下位トレインフラグが設定されているか否かが判定される。実施例では、下位トレインフラグは、カードマークに含まれる最下位から三番目のビットであり、上述したように、ポインタが下位のトレインを指し示しているか否かを示している。下位トレインフラグが設定されていると判定された場合には、カードマークを更新する処理を完了する。一方、下位トレインフラグが設定されていないと判定された場合には、ステップ７７６で、下位トレインフラグを設定する。下位トレインフラグの設定後、カードマークの更新処理を完了する。

【００６５】一方、ステップ７６０で新世代フラグが設定されていないと判定された場合には、処理はステップ７６６に進み、下位トレインフラグが設定されているか否かが判定される。下位トレインフラグが設定されていないとステップ７６６で判定されると、ステップ７６７で、下位トレインに対するポインタの存在を示す下位トレインフラグを設定する。下位トレインフラグが設定されると、次のステップ７６８で、ルート・アレイを割り当て、割り当てられたルート・アレイを指し示すようにカードマークを設定する。次に、ステップ７６９で、新しいルート・アレイの割り当てが成功したか否かが判定される。割り当てが成功した場合には、次に、ステップ７７０で、そのルート・アレイにまだ追跡してきたルートが存在していない場合には、ルート・アレイに追跡ルートを挿入する。その後、カードマークを更新する処理を完了する。一方、ステップ７６９で、新しいルート・アレイの割り当てに成功しなければ、処理がステップ７６９からステップ７６２に移り、ルート・アレイのオーバーフローを示すようにカードマークが設定される。ルート・アレイのオーバーフローを示すようにカードマークが設定された後、カードマークを更新する処理を完了する。

【００６６】ステップ７６６で、下位トレインに対するポインタの存在を示す下位トレインフラグが設定されていると判定された場合、ステップ７７２で、対応するルート・アレイがオーバーフローしているか否かの判定が行われる。ルート・アレイがオーバーフローしている場合には、ステップ７６２で、ルート・アレイのオーバーフローを示すようにカードマークが設定される。一方、

ステップ７７２でルート・アレイがオーバーフローしていないと判定された場合には、ステップ７７０で、そのルート・アレイにまだ追跡してきたルートが存在していない場合には、ルート・アレイに追跡ルートを挿入する。

【００６７】ステップ７４２で、ポインタが旧世代内の下位トレインを指し示していないと判定された場合、ステップ７４４で、同一トレイン内の下位のカーをポインタが指し示しているか否かが判定される。ポインタが同一トレイン内の下位のカーを指し示していない場合には、カードマークの更新処理を完了する。一方、ポインタが同一トレイン内の下位のカーを指し示していると判定された場合には、処理がステップ７８０に進み、新世代に対するポインタの存在を示す新世代フラグが設定されているか否かが判定される。

【００６８】ステップ７８０で新世代フラグが設定されていると判定された場合には、次に、ステップ７８２で、同一トレインフラグが設定されているか否かの判定が行われる。即ち、同一トレイン内の下位のカーに対するポインタが存在しているか否かの判定が行われる。同一トレインフラグが設定されている場合には、カードマークを更新する処理を完了する。逆に、同一トレインフラグが設定されていない場合には、次のステップ７８３で同一トレインフラグを設定する。同一トレインフラグを設定した後、カードマークを更新する処理を完了する。

【００６９】一方、ステップ７８０で新世代フラグが設定されていないと判定された場合には、処理がステップ７８６に進み、下位トレインに対するポインタの存在を示すカードマークの下位トレインフラグが設定されているか否かが判定される。下位トレインフラグが設定されている場合には、処理がステップ７８２に進み、同一トレインフラグが設定されているか否かの判定を行う。

【００７０】下位トレインフラグが設定されていない場合、即ち、下位トレインに対するポインタが存在していない場合には、処理がステップ７８６からステップ７８８に移り、そのカードマークの同一トレインフラグが設定されているか否かが判定される。言い換えると、ステップ７８８で、そのカードマークが、同一トレインの下位のカードを示すポインタの存在を示しているか否かの判定が行われる。同一トレインフラグが設定されていると判定された場合には、次に、ステップ７９０で、そのカードマークに関係するルート・アレイがオーバーフローしているか否かが判定される。ルート・アレイがオーバーフローしている場合には、ステップ７９３で、そのルート・アレイがオーバーフローしていることを示すようにカードマークが設定される。逆に、ルート・アレイがオーバーフローしていないと判定された場合には、次に、ステップ７９２で、そのルート・アレイに追跡してきたルートがまだ存在していない場合には、ルート・アレイに追跡ルートを挿入する。必要に応じて、ブロック・アレイにルートを挿入した後、カードマークを更新する処理を完了する。

【００７１】一方、ステップ７８８で、同一トレインフラグが設定されていないと判定されると、次に、ステップ７９４で、ルート・アレイを割り当て、更に、割り当てられたルートアレイを指し示すようにカードマークを設定する。次のステップ７９６で、ルート・アレイの割り当てが成功したか否がの判定が行われる。ルート・アレイの割り当てが成功しなかった場合、ステップ７８２で、ルート・アレイのオーバーフローを示すようにカードマークが設定される。一方、ルート・アレイの割り当てが成功した場合には、処理はステップ７９２に進み、そのルート・アレイに追跡してきたルートがまだ存在していない場合には、ルート・アレイに追跡ルートを挿入する。

【００７２】図１３及び図１４は、本発明の一実施例にしたがって、旧世代メモリ内で実行されるガーベジコレクション処理に関係するステップ、即ち、図７のステップ６０８の詳細を示すフローチャートである。まず、ステップ８０２で、固定ルート、すなわち、本実施例では、旧世代メモリを直接指し示すルートを追跡する。本発明の一実施例にしたがって固定ルートを追跡する処理に関するステップは、図９ないし図１２を参照して、上述した。

【００７３】次に、ステップ８０４で、新世代からのルートを追跡する。即ち、新世代から旧世代につながるルートの関係を追跡する。次に、処理がステップ８０４からステップ８０６に進み、設定された下位トレインフラグを有する次の入力の位置決めをするために、カード・アレイ、即ち、カードマークのアレイを走査する。次のステップ８０８で、該当する入力、すなわち、設定された下位トレインフラグを有する入力が見つかったか否かが判定される。該当する入力が見つかったと判定された場合には、ステップ８１２で、見つかった入力に関して、新世代フラグが設定されているか、および／あるいは、ルート・アレイがオーバーフローしているかの判定が行われる。新世代フラグが設定されているか、および／あるいは、ルート・アレイがオーバーフローしている場合には、ステップ８１４で、カード内のすべてのオブジェクトを走査して、ルートを検索し、見つかったルートの追跡を行う。先にも説明したように、ルートの追跡に関するステップは、図９ないし図１２を参照して上述した。ルートの追跡を実行後、処理はステップ８０６に戻り、設定された下位トレインフラグを有する次の入力を位置決めするように、カード・アレイの走査を行う。

【００７４】ステップ８０８で見つけられた入力、即ち、カードマークに関して、新世代フラグも設定されていないし、ルート・アレイもオーバーフローしていないとステップ８１２で判定された場合には、処理がステッ

プ８１６に移り、入力に関係するルート・アレイを走査して、そのルート・アレイに関係するルートを追跡する。ルートを追跡した後、ステップ８０６で、設定された下位トレインフラグを有する次の入力を検索するためにカード・アレイを走査する。

【００７５】一方、ステップ８０８で、設定された下位トレインフラグを有する入力を探すためにカード・アレイを走査した結果、該当する入力が見つからなかった場合には、ステップ８２０で、すべての複製されたオブジェクトの走査が完了するまで、旧世代内でルートの追跡が実行される。例えば、他のトレインから参照されている所定のトレイン内のオブジェクトをそれらのトレインに複製する。すべての複製されたオブジェクトの走査が完了したら、ステップ８３０で、走査処理の間に、最下位トレインを指し示すルートに遭遇したか否かの判定が行われる。最下位トレインに対するルートに遭遇しなかったと判定された場合には、ステップ８４０で、最下位トレイン全体を解放する。言い換えると、最下位トレインによって保持されている旧世代メモリを解放する。最下位トレインに対するポインタが存在しない場合、最下位トレインはガーベジのみを含んでいるという事実に基づいて、最下位トレイン全体を解放するものでもよい。最下位トレイン全体を解放した場合、互いに参照しあい、同一トレイン内の異なったカーに位置する循環構造体を回収することができる。最下位トレイン全体を解放した後、旧世代ガーベジコレクション処理を終了する。

【００７６】一方、最下位トレインへのルートに遭遇したとステップ８３０で判定されると、次に、ステップ８３２で、カード・アレイを走査して、設定された同一トレインフラグを有する次の入力、即ち、カードマークを探す。次のステップ８３４で、設定された同一トレインフラグを有する入力が見つかったか否かが判定される。ここで、設定された同一トレインフラグを有する入力が見つからなかったと判定された場合には、ステップ８３６で、すべての複製されたオブジェクトの走査が完了するまで、旧世代内部でルートの追跡が行われる。すべての複製されたオブジェクトを走査するとは、例えば、ポインタの推移的な検索を行うことである。すべての複製されたオブジェクトの走査が完了すると、ステップ８３７で、最下位トレイン内の最下位カーを解放して、その後、旧世代ガーベジコレクション処理を終了する。

【００７７】逆に、ステップ８３４で、設定された同一トレインフラグを有する入力、即ち、カードマークが見つかったと判定された場合には、処理はステップ８３８に移り、その入力に関して、新世代フラグが設定されているか、下位トレインフラグが設定されているか、あるいは、ルート・アレイがオーバーフローしているかが判定される。入力が設定された新世代フラグのどれかまたはすべてを持つ場合には、処理がステップ８５０に進み、カード内のすべてのオブジェクトを走査して、ルートを検索し、見つかったルートを追跡する。ルートの追跡後、処理はステップ８３２に戻り、設定された同一トレインフラグを有する次の入力を検索するために、カード・アレイの走査がもう一度行われる。

【００７８】一方、ステップ８３４で見つかった入力に関して、新世代フラグも設定されていないし、下位トレインフラグも設定されていないし、また、ルート・アレイもオーバーフローしていないとステップ８３８で判定された場合には、ステップ８５６で、入力に関係するルート・アレイが走査され、そのルート・アレイ内のルートの追跡が行われる。ルートの追跡後、処理はステップ８３２に戻り、設定された同一トレインフラグを有する次の入力を検索するために、カード・アレイの走査が行われる。

【００７９】本発明にしたがって世代間ガーベジコレクションを利用するコンピュータプログラムは、種々の異なったコンピュータシステム上で実行可能である。図１５に、本発明を実現するのに適した典型的な汎用コンピュータシステムを示す。コンピュータシステム９３０は、任意の数のプロセッサ９３２（中央処理装置即ちＣＰＵと称する）と、プロセッサに接続される一次記憶装置９３４（通常、リードオンリーメモリ即ちＲＯＭ）及び一次記憶装置９３６（通常、ランダムアクセスメモリ即ちＲＡＭ）とを含む記憶装置と、を備える。当業者に周知のように、ＲＯＭは、ＣＰＵ９３２に対して、一方向にデータおよび命令を伝送するのに対して、ＲＡＭは、双方向にデータおよび命令を伝送する。一次記憶装置９３４および９３６が、任意の適当なコンピュータ読み取り可能な媒体を備えるようにしてもよい。大容量記憶装置のような二次記憶媒体９３８も、ＣＰＵ９３２に対して双方向に連結され、追加のデータ記憶容量を実現している。大容量記憶装置９３８は、コンピュータコード、データ等を含むプログラムを格納するために利用可能なコンピュータ読み取り可能な媒体であり、通常は、一次記憶装置９３４および９３６よりも処理速度の遅いハードディスクあるいはテープのような記憶媒体で構成されている。また、大容量記憶装置９３８を、磁気テープあるいは紙テープリーダや他の周知の装置の形態で実現するものとしてもよい。大容量記憶装置９３８内部に保持される情報を、仮想記憶のようにＲＡＭ９３６の一部として組み込むこともできる。ＣＤ－ＲＯＭ等の所定の一次記憶装置９３４も、また、ＣＰＵに対して一方向にデータを伝送することができる。

【００８０】ＣＰＵ９３２は、さらに、一つあるいは複数の入出力装置９４０に接続される。入出力装置９４０の例としては、これらに限定されるものではないが、ビデオモニター、トラックボール、マウス、キーボード、マイク、タッチ式ディスプレイ、変換器カードリーダ、磁気テープあるいは紙テープリーダ、タブレット、スタイラス、音声あるいは手書き認識装置、他のコンピュー

タ等の周知の入力装置が挙げられる。また、ＣＰＵ９３２を、９１２で一般的に示されるようなネットワーク接続を用いて、インターネットやイントラネット等のコンピュータネットワークや遠距離通信ネットワークに任意に接続するようにしてもよい。このようなネットワーク接続を利用して、ＣＰＵ９３２は、ネットワークから情報を入力することもできるし、また、前述した方法ステップを実行中にネットワークに情報を出力することも可能である。ＣＰＵ９３２によって実行される一連の命令として示される、このような情報を、搬送波内に具現化されるコンピュータデータ信号の形態でネットワークから入力したり、ネットワークに出力したりすることができる。上述した装置や材料は、コンピュータハードウェア並びにソフトウェアの当業者には周知のものである。

【００８１】以上、本発明の実施例をいくつか説明したが、本発明は、その要旨や範囲を逸脱することなく、様々な形態で具現可能である。例えば、新世代ガーベジコレクションや旧世代ガーベジコレクションを行う場合のステップの順番は変更可能である。また、本発明の要旨や範囲を逸脱することなく、いくつかのステップを除いたり、追加したりすることも可能である。

【００８２】上述した実施例では、世代ガーベジコレクションをメモリの新世代および旧世代で実行されるものとして説明したが、世代ガーベジコレクションをメモリの多くの世代にまたがって実行するものとしてもよい。即ち、本発明の世代ガーベジコレクションの方法を、例えば、新世代、「中間世代」、旧世代等のように、各世代内のオブジェクトの年齢によって区別される複数の世代に分割可能なメモリ上で実行するようにしてもよい。複数の世代が存在する場合には、世代間ポインタは、通常、いずれか二つの世代をつなぐものである。

【００８３】また、上述した実施例では、カードマークを、２７ビットのポインタと、予備ビットと、同一トレインフラグと、下位トレインフラグと、新世代フラグと、汚染フラグとを含む３２ビットのワードとして説明した。が、本発明の要旨や範囲を逸脱することなく、カードマークを様々に変更可能である。例えば、あるシステムの所定の用件の少なくとも一部にしたがって、カードマークを３２ビットより少ないビットで構成しても、あるいは、３２ビットより多いビットで構成することもできる。カードマークを構成するビットは様々に変更可能である。例えば、カードマークを構成する３２ビットが、２６ビットのポインタと、２ビットの「ステータス・インジケータ（状態表示部）」あるいはタグビットを含むように構成してもよい。ステータス・インジケータビットの様々な組み合わせの値が、カードマークが汚染されているか、あるいは、クリーンか、また、カードマークが新世代ポインタを含むか、あるいは、含まないか、を示すように、ステータス・インジケータビットを構成するようにしてもよい。また、カードマークが、下位トレインに対する何らかのポインタが存在するか否かを示す下位トレインフラグ、所定のトレイン内の下位のカーに対する何らかのポインタがそのトレイン内に存在するか否かを示す同一トレインフラグ、下位トレインオーバーフローフラグ、および、同一トレインオーバーフローフラグを含むように構成してもよい。

【００８４】さらに、上述の実施例では、カードマーク内部の最下位ビットを、例えば、カードマークが汚染されているか否かを示すために用いられるフラグとして説明したが、カードマークのフラグは、カードマーク内の任意の適当な位置にあればよい。例えば、フラグを表わすビットが、カードマーク内部の最上位ビットでもよい。あるいは、フラグを表わすビットが、カードマークの中に点在していてもよい。

【００８５】上述の実施例では、旧世代メモリ内のカーの大きさを固定したものとして説明したが、カーの大きさを動的に割り当てるようにしてもよい。即ち、あるカー内に位置するべきオブジェクトの所定の用件に基づいて、そのカーの大きさを決めるようにしてもよい。例えば、本発明の要旨や範囲から逸脱することなく、カー内部のオブジェクトに起因するポインタの数を最小にするように、ガーベジコレクション処理の実行中にカーの大きさを割り当てるようにしてもよい。

【００８６】従来のガーベジコレクションの方法も旧世代メモリ内で状況に応じて実現可能である。例えば、旧世代メモリがいっぱいになった場合を考える。旧世代メモリがいっぱいの場合、カー上で旧世代ガーベジコレクションを実行しても、すぐに利用可能なように充分な量のメモリを解放することができない場合がある。このような時に、本発明の要旨や範囲から逸脱することなく、旧世代メモリがいっぱいな場合に、可能なかぎりたくさんの量の旧世代メモリを解放するように、マーク掃引コレクション処理のような従来のガーベジコレクション処理を実行してもよい。このように、上述の実施例は例示に過ぎず、何ら発明を限定するものではない。本発明は、上述の説明に何ら限定されるものではなく、特許請求の範囲内で様々に変更可能である。

【図面の簡単な説明】

【図１】従来技術にしたがって、オブジェクトを含むコンピュータメモリの領域を例示する図である。

【図２】従来技術にしたがって、新世代と旧世代とに区分されるメモリとルートとの間のインターフェースを例示する図である。

【図３】従来技術にしたがって、記憶集合に関係するメモリを例示する図である。

【図４】本発明の一実施例にしたがって、トレインに分割される旧世代メモリを例示する図である。

【図５】本発明の一実施例にしたがって、カードマーク・アレイと関連するルート・アレイのプールとを例示する図である。

【図６】本発明の一実施例にしたがって、コンピュータプログラムを実行するためのステップを示すフローチャートである。

【図７】本発明の一実施例にしたがって、ガーベジコレクションを実行する処理、即ち、図６のステップ５１０の詳細を示すフローチャートである。

【図８】本発明の一実施例にしたがって、新世代メモリ内で実行されるガーベジコレクション処理に関するステップ、即ち、図７のステップ６０４の詳細を示すフローチャートである。

【図９】本発明の一実施例にしたがって、一つのルートを追跡する処理に関するステップを示すフローチャートである。

【図１０】本発明の一実施例にしたがって、カードマークを更新する処理に関するステップ、即ち、図９のステップ７２８の詳細を示すフローチャートである。

【図１１】本発明の一実施例にしたがって、カードマークを更新する処理に関するステップ、即ち、図９のステップ７２８の詳細を示すフローチャートである。

＊【図１２】本発明の一実施例にしたがって、カードマークを更新する処理に関するステップ、即ち、図９のステップ７２８の詳細を示すフローチャートである。

【図１３】本発明の一実施例にしたがって、旧世代ガーベジコレクション処理に関係するステップ、即ち、図７のステップ６０８の詳細を示すフローチャートである。

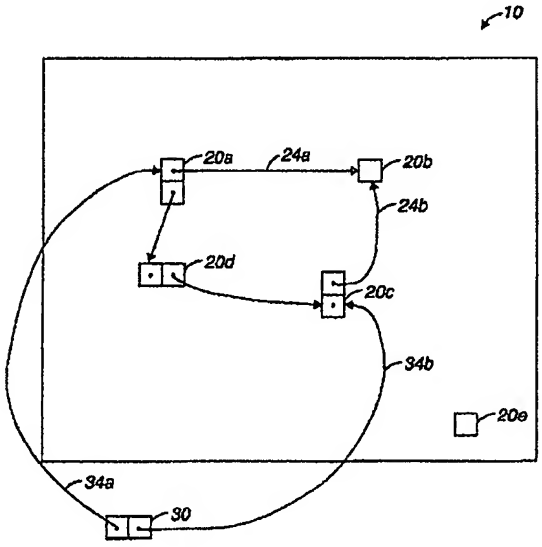
【図１４】本発明の一実施例にしたがって、旧世代ガーベジコレクション処理に関係するステップ、即ち、図７のステップ６０８の詳細を示すフローチャートである。

【図１５】本発明を実現するのに適したコンピュータシステムを例示する図である。

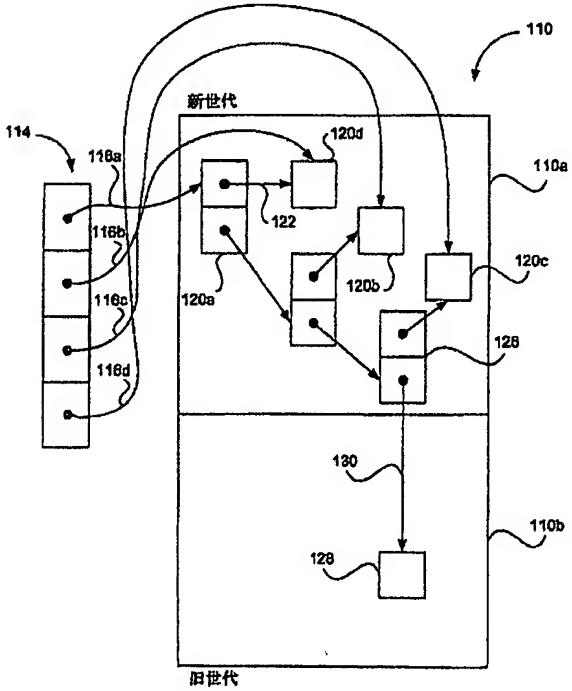
【符号の説明】

９３０…コンピュータシステム
９３２…ＣＰＵ
９３４…一次記憶装置
９３６…ＲＡＭ
９３８…二次記憶媒体
９４０…入出力装置

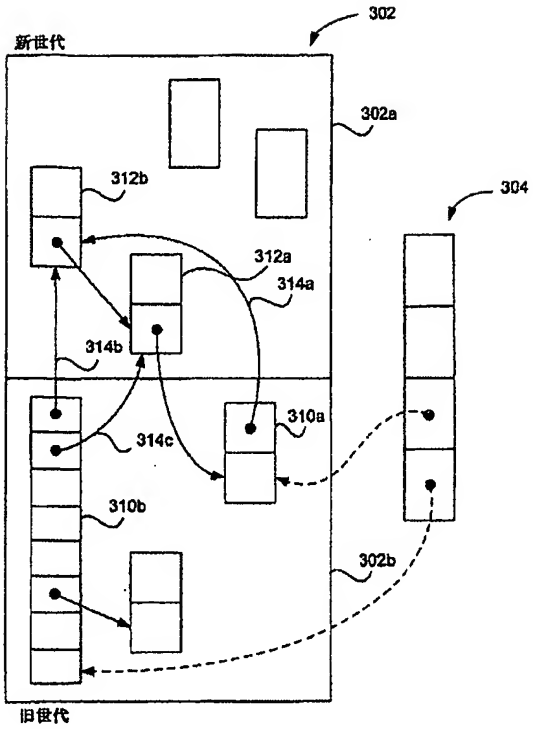
【図１】



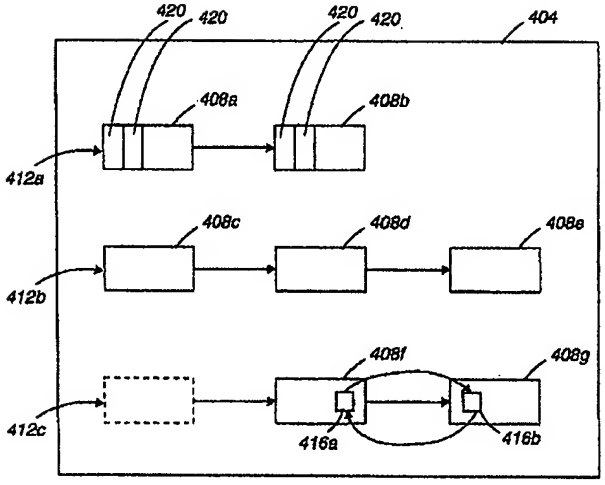
【図２】



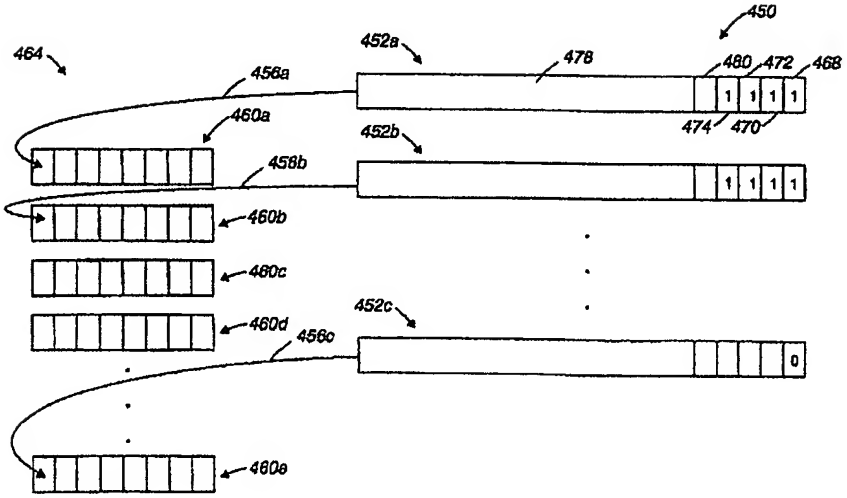
【図３】


新世代
302
302a
312b
304
312a
314a
314b
310a
314c
310b
302b
旧世代

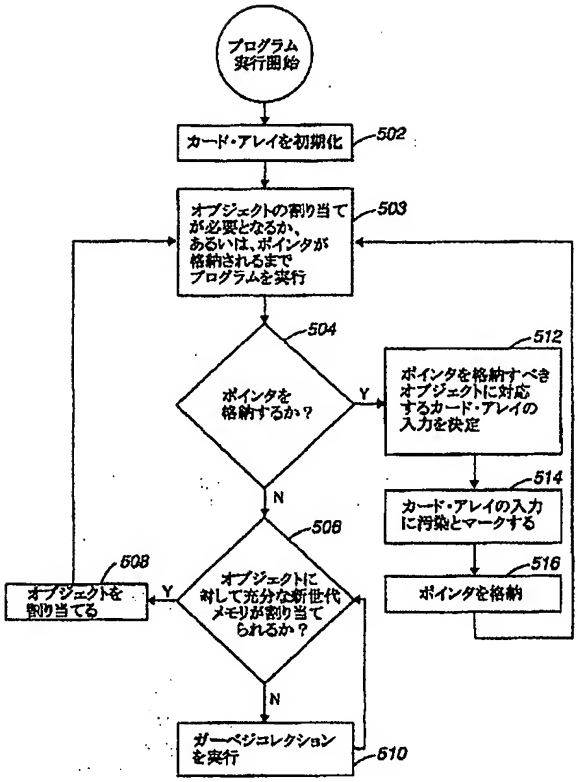
【図４】


420
420
420
420
404
408a
408b
412a
408c
408d
408e
412b
408f
408g
412c
416a
416b

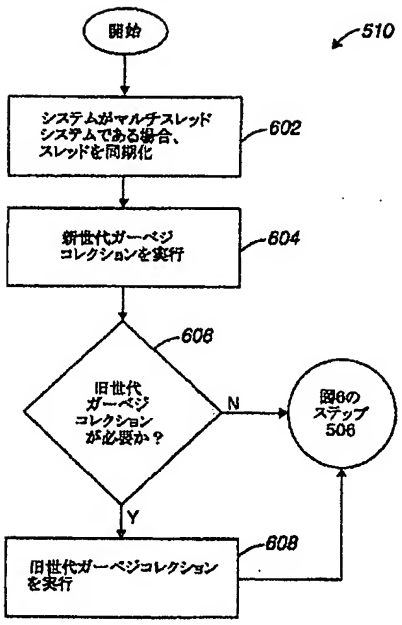
【図５】


450
464
452a
456a
478
480
472
468
1
1
1
1
460a
474
470
452b
458b
460b
460c
460d
452c
456c
0
460e

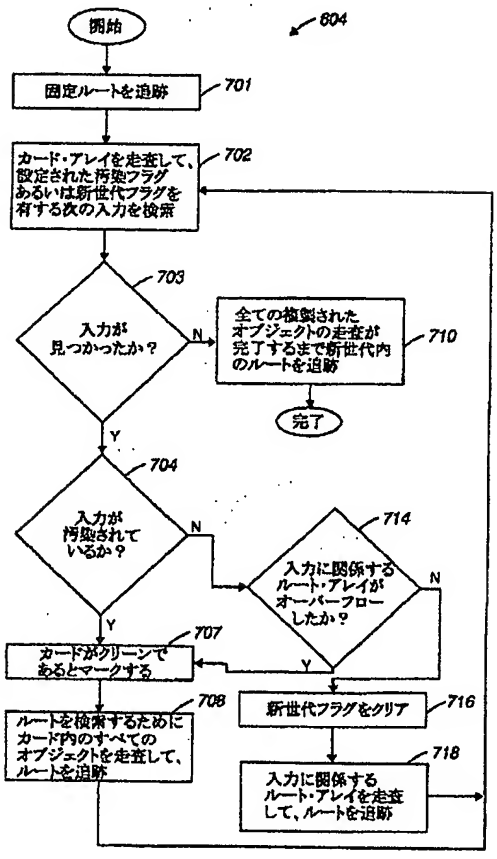
【図６】


プログラム実行開始
カード・アレイを初期化
502
オブジェクトの割り当てが必要となるか、あるいは、ポインタが格納されるまでプログラムを実行
503
ポインタを格納するか？
504
Y
N
ポインタを格納すべきオブジェクトに対応するカード・アレイの入力を決定
512
カード・アレイの入力に汚染とマークする
514
ポインタを格納
516
オブジェクトに対して充分な新世代メモリが割り当てられるか？
506
Y
N
オブジェクトを割り当てる
508
ガーベジコレクションを実行
510

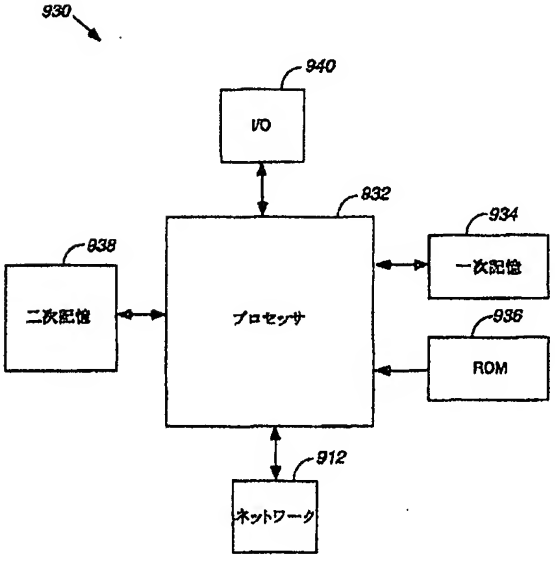
【図７】


開始
510
システムがマルチスレッドシステムである場合、スレッドを同期化
602
新世代ガーベジコレクションを実行
604
旧世代ガーベジコレクションが必要か？
606
N
Y
図6のステップ506
旧世代ガーベジコレクションを実行
608

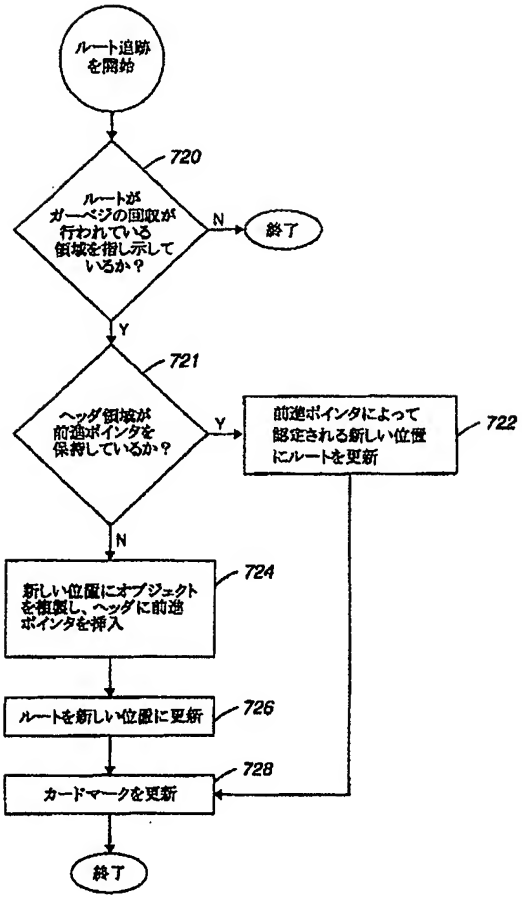
【図８】


開始
604
固定ルートを追跡
701
カード・アレイを走査して、設定された汚染フラグあるいは新世代フラグを有する次の入力を検索
702
入力が見つかったか？
703
N
全ての複製されたオブジェクトの走査が完了するまで新世代内のルートを追跡
710
完了
Y
入力が汚染されているか？
704
N
入力に関係するルート・アレイがオーバーフローしたか？
714
N
Y
カードがクリーンであるとマークする
707
Y
新世代フラグをクリア
716
ルートを検索するためにカード内のすべてのオブジェクトを走査して、ルートを追跡
708
入力に関係するルート・アレイを走査して、ルートを追跡
718

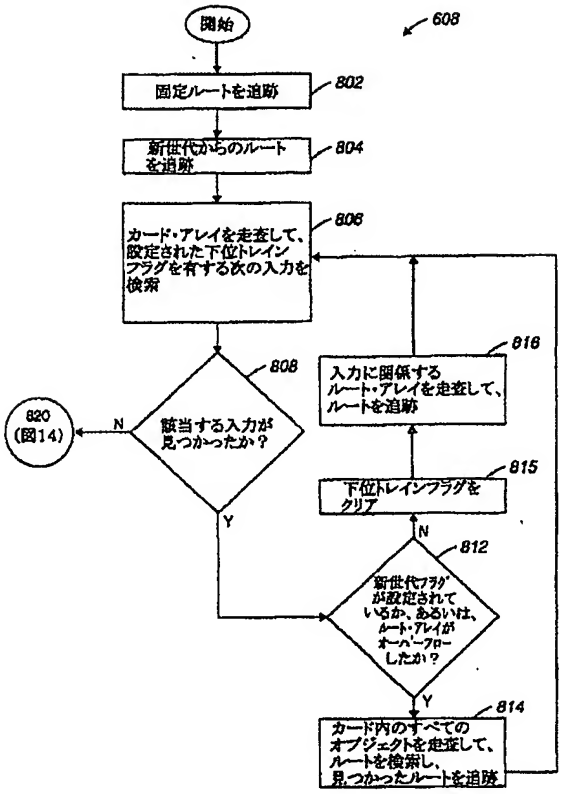
【図１５】


930
940
I/O
832
二次記憶
838
プロセッサ
一次記憶
934
ROM
936
ネットワーク
912

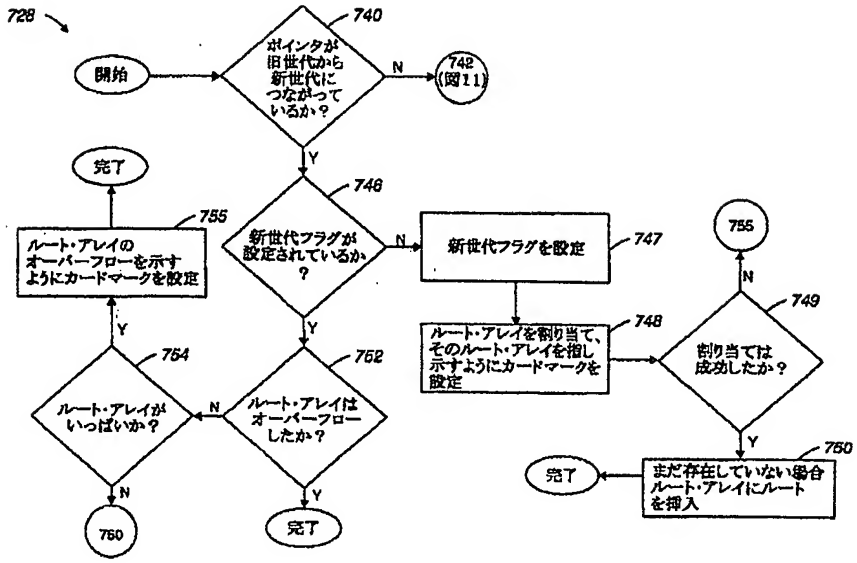
【図９】


ルート追跡を開始
720
ルートがガーベジの回収が行われている領域を指し示しているか？
N
終了
Y
721
ヘッダ領域が前進ポインタを保持しているか？
Y
前進ポインタによって認定される新しい位置にルートを更新
722
N
新しい位置にオブジェクトを複製し、ヘッダに前進ポインタを挿入
724
ルートを新しい位置に更新
726
カードマークを更新
728
終了

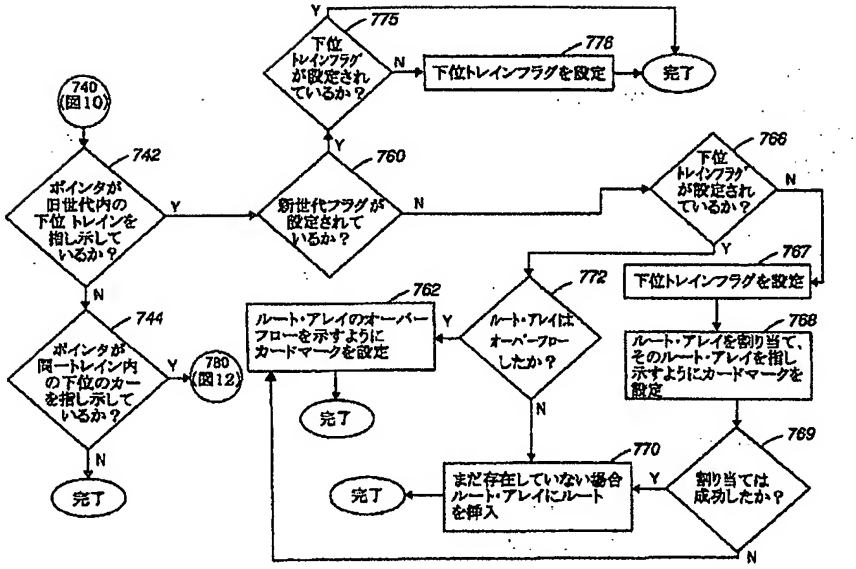
【図１３】


608
開始
固定ルートを追跡
802
新世代からのルートを追跡
804
カード・アレイを走査して、設定された下位トレインフラグを有する次の入力を検索
806
808
該当する入力が見つかったか？
N
820 (図14)
Y
入力に関係するルート・アレイを走査して、ルートを追跡
816
下位トレインフラグをクリア
815
N
812
新世代フラグが設定されているか、あるいは、ルート・アレイがオーバーフローしたか？
Y
814
カード内のすべてのオブジェクトを走査して、ルートを検索し、見つかったルートを追跡

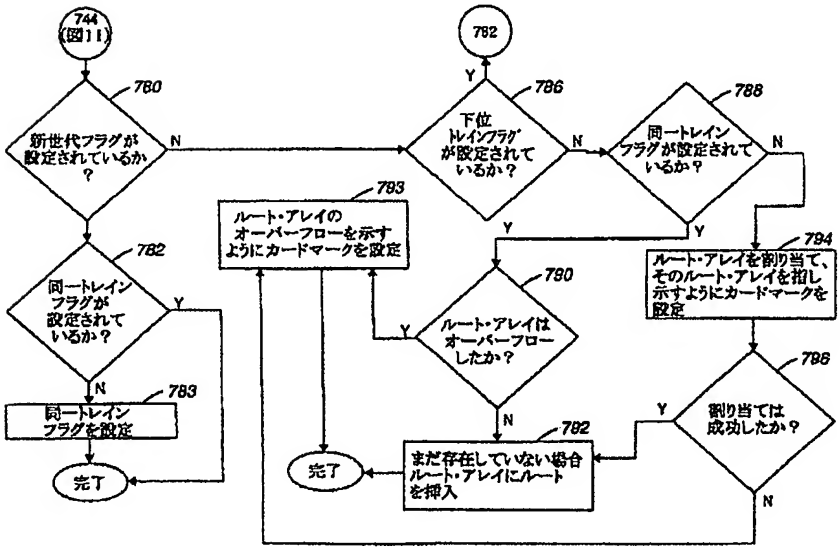
【図１０】


728
開始
740
ポインタが旧世代から新世代につながっているか？
N
742 (図11)
Y
完了
748
新世代フラグが設定されているか？
N
新世代フラグを設定
747
755
755
ルート・アレイのオーバーフローを示すようにカードマークを設定
Y
ルート・アレイを割り当て、そのルート・アレイを指し示すようにカードマークを設定
748
N
749
割り当ては成功したか？
754
ルート・アレイがいっぱいか？
N
762
ルート・アレイはオーバーフローしたか？
Y
760
Y
完了
完了
750
まだ存在していない場合ルート・アレイにルートを挿入

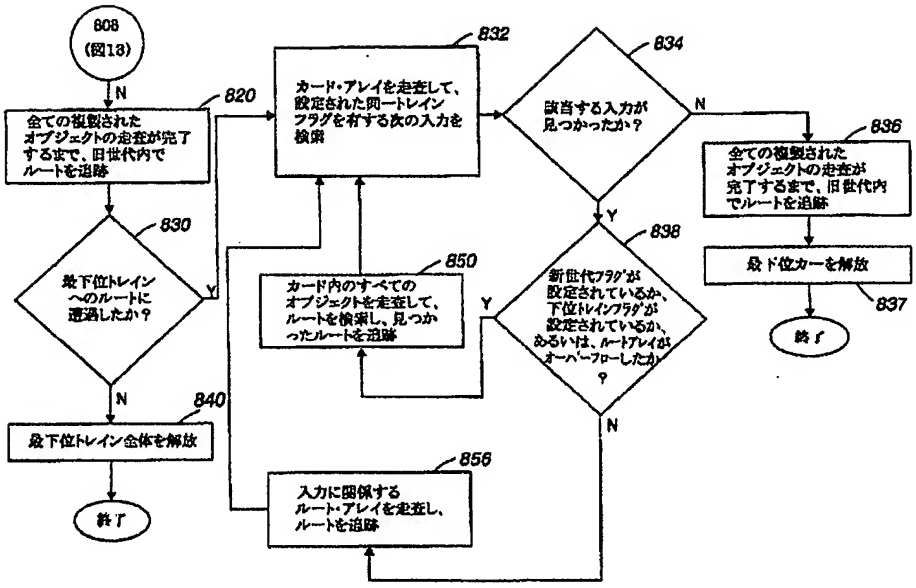
【図１１】


740 (図10)
742
ポインタが旧世代内の下位トレインを指し示しているか？
744
ポインタが同一トレイン内の下位のカードを指し示しているか？
780 (図12)
完了
760
新世代フラグが設定されているか？
762
ルート・アレイのオーバーフローを示すようにカードマークを設定
完了
772
ルート・アレイはオーバーフローしたか？
770
まだ存在していない場合ルート・アレイにルートを挿入
完了
766
下位トレインフラグが設定されているか？
767
下位トレインフラグを設定
768
ルート・アレイを割り当て、そのルート・アレイを指し示すようにカードマークを設定
769
割り当ては成功したか？
775
下位トレインフラグが設定されているか？
778
下位トレインフラグを設定
完了
Y
N

【図１２】


744 (図11)
780
新世代フラグが設定されているか？
782
同一トレインフラグが設定されているか？
783
同一トレインフラグを設定
完了
782
786
下位トレインフラグが設定されているか？
793
ルート・アレイのオーバーフローを示すようにカードマークを設定
790
ルート・アレイはオーバーフローしたか？
782
まだ存在していない場合ルート・アレイにルートを挿入
完了
788
同一トレインフラグが設定されているか？
794
ルート・アレイを割り当て、そのルート・アレイを指し示すようにカードマークを設定
796
割り当ては成功したか？
Y
N

【図１４】



フロントページの続き

(71)出願人　591064003
901　SAN　ANTONIO　ROAD
PALO　ALTO，CA　94303，U.
S．A.

(72)発明者　ラース・バク
アメリカ合衆国　カリフォルニア州94303
パロ・アルト，コリーナ・ウェイ，3782

【外国語明細書】

1 Title of Invention

Methods and Apparatus for Generational Dynamic Management of Computer Memory

2 Claims

1. A computer-implemented method for dynamically managing memory associated with a computer system, the memory including a first memory section and a second memory section that is divided into a plurality of blocks, the blocks in the second memory section each having an associated marker, the method comprising:

performing a first garbage collection on the first memory section;

performing a second garbage collection on a selected one of the blocks in the second memory section;

performing a third garbage collection on the selected block in the second memory section, wherein the third garbage collection includes determining whether the selected block includes a first object which references a second object which is not included in the selected block based at least in part on a status indicated by the marker associated with the selected block, wherein the status includes an indication of whether the reference to the second object was stored after the second garbage collection was performed; and

when the reference to the second object was stored after the second garbage collection was performed, creating a new root array using the selected marker.

2. A computer-implemented method as recited in claim 1 wherein when it is determined that the first object does not reference a second object which is not included in the selected block, the method further includes releasing the selected block.

3. A computer-implemented method as recited in one of claims 1 and 2 wherein when it is determined that the selected block includes a first object which references a second object, the step of performing the third garbage collection further includes:

determining whether the second object is in the first memory section using the selected block marker; and

when it is determined that the second object is in the first memory section, a root array associated with the selected block marker is updated to insure that the root array associated with the selected block marker includes a pointer to the second object.

4. A computer-implemented method as recited in one of claims 1 and 2 wherein when it is determined that the selected block includes a first object which references a second object, the step of performing the third garbage collection further includes:

determining whether the second object is in the second memory section using the selected block marker; and

when it is determined that the second object is in the second memory section, a root array associated with the selected block marker is scanned to identify references to other objects.

5. A computer-implemented method as recited in claim 4 further including following the references to other objects.

6. A computer-implemented method as recited in one of claims 1 and 2 wherein the plurality of blocks are arranged as a plurality of trains, the selected block being included in a first one of the plurality of trains, the step of performing the third garbage collection further including:

determining whether the second object is in a second one of the plurality of trains based at least in part on the status indicated by the marker associated with the block.

7. A computer-implemented method as recited in claim 6 wherein when it is determined that the second object is not in a second one of the plurality of trains, the method further includes releasing the second train.

8. A computer-implemented method as recited in one of claims 1 and 2 wherein the plurality of blocks are arranged as a plurality of cars, the plurality of cars further being arranged as a plurality of trains, the selected block being included in a first one of the plurality of cars that forms a selected one of the plurality of trains, the step of performing the third garbage collection further including:

determining whether the second object is in a second one of the plurality of cars that forms the selected train based at least in part on the status indicated by the marker associated with the block.

9. A computer-implemented method as recited in claim 8 wherein when it is determined that the second object is not in the second car of the selected train, the method further includes releasing the second car.

10. A computer-implemented method for dynamically managing memory associated with a computer system, the memory being divided into a plurality of blocks, the blocks each having an associated marker, the method comprising:

performing a first garbage collection on a selected one of the blocks;

performing a second garbage collection on the selected block, wherein the second garbage collection includes determining whether the selected block includes a first object which references a second object which is not included in the selected block based at least in part on a status indicated by the marker associated with the

selected block, the status indicated by the marker including an indication of whether the reference to the second object was stored after the first garbage collection was performed; and

when the reference to the second object was stored after the first garbage collection was performed, creating a new root array using the selected block.

11. A computer-implemented method as recited in claim 10 wherein when it is determined that the first object does not reference a second object which is not included in the selected block, the method further includes releasing the selected block.

12. A computer-implemented method as recited in one of claims 10 and 11 wherein the plurality of blocks are arranged as a plurality of trains, the selected block being included in a first one of the plurality of trains, the step of performing the garbage collection further including:

determining whether the second object is in a second one of the plurality of trains based at least in part on the status indicated by the marker associated with the block; and

when it is determined that the second object is not in a second one of the plurality of trains, the method further includes releasing the second train.

13. A computer-implemented method as recited in claim 10 further including an additional memory section, wherein when it is determined that the second object is not included in the selected block, the step of performing the garbage collection on the selected block further includes determining whether the second object is included in the additional memory section based at least in part on the status indicated by the marker associated with the selected block.

14. A computer-implemented method for allocating a selected object in computer memory, the computer memory including a first section, a second section,

and an array of words associated with elements in the second section, the words being arranged to indicate whether the contents of their associated elements reference objects in the first section, the method comprising:

determining whether the first section is suitable for the selected object to be allocated;

allocating the selected object when it is determined that the first section is suitable for the object to be allocated; and

performing a garbage collection in the first section when it is determined that the first section is not suitable for the selected object to be allocated, wherein performing the garbage collection includes scanning the array of words to locate selected words that indicate that their associated elements in the second section reference particular objects in the first section, and wherein the particular objects in the first section are retained during the garbage collection.

15. A computer-implemented method as recited in claim 14 wherein when the selected markers that indicate that their associated elements in the second section reference the particular objects are located, performing the garbage collection in the first section further includes:

following associations of roots within the associated elements in the second section, wherein following the associations of the roots includes updating the roots to new locations within the computer memory and updating the selected words.

16. A computer-implemented method as recited in claim 15 wherein updating the selected words includes:

determining when a selected one of the roots is in the second section and references a selected one of the particular objects is in the first section; and

when it is determined that the selected root is in the second section and references the selected particular object in the first section, updating the selected

words to indicate that the selected root is in the second section and the selected particular object is in the first section.

17. A computer-implemented method as recited in claim 14 further including:

performing a garbage collection in the second section, wherein performing the garbage collection includes following associations of roots associated with selected ones of the elements, the roots being associated with the new generation, whereby following the associations of the roots involves updating some of the words in the array of words.

18. A marker for use in a computer system including a first memory section and a second memory section that is arranged as a plurality of elements, the marker being associated with a first element selected from the plurality of elements, the marker comprising:

a first indicator arranged to identify whether the first selected element references an object contained within the first memory section.

19. A marker for use in a computer system as recited in claim 18 further including a reference to the object, the reference to the object being a pointer to an array which contains an address for the object.

20. A computer system comprising:

memory including a first memory section and a second memory section that is segmented into a plurality of blocks;

an array of markers, each marker corresponding to an associated block in the second memory section, the markers being configured to indicate when their associated blocks reference objects outside of their associated block;

a set of root arrays, the root arrays being arranged to hold addresses of the objects, wherein selected markers from the array of markers are associated with the set of root arrays;

a first garbage collector for reclaiming space within the first memory section; and

a second garbage collector for reclaiming space within the second memory section based at least in part upon the status of the markers in the array of markers.

21. A computer system as recited in claim 20 wherein a first marker selected from the array of markers includes a section indicator that identifies when the associated block of the first marker references a first object in the first memory section.

22. A computer system as recited in one of claims 20 and 21 wherein the plurality of blocks is arranged as a plurality of cars, the plurality of cars further being arranged as a plurality of trains.

23. A computer system comprising:

memory that is segmented into a plurality of blocks;

an array of markers, each marker corresponding to an associated block in the memory, the markers being configured to indicate when their associated blocks reference objects outside of their associated block;

a set of root arrays, the root arrays being arranged to hold addresses of the objects, wherein selected markers from the array of markers are associated with the set of root arrays; and

a garbage collector for reclaiming space within the memory based at least in part upon the status of the markers in the array of markers.

24. A computer program product for dynamically managing memory associated with a computer system, the computer program product comprising:

computer code that performs a first garbage collection in a first memory section of the computer;

computer code that performs a second garbage collection on a second memory section of the computer, the second memory section being divided into a plurality of blocks, wherein the second garbage collection includes determining whether a block selected from the plurality of blocks includes a first object which references a second object which is not included in the selected block based at least in part on a status indicated by the marker associated with the selected block; and

a computer readable medium that stores the computer codes.

25. A computer program product for causing a processor of a computer system to dynamically manage memory associated with the computer system, the computer program product comprising:

computer code that performs a first garbage collection in a first memory section of the computer;

computer code that performs a second garbage collection on a second memory section of the computer, the second memory section being divided into a plurality of blocks, wherein the second garbage collection includes determining whether a block selected from the plurality of blocks includes a first object which references a second object which is not included in the selected block based at least in part on a status indicated by the marker associated with the selected block; and

a computer data signal embodied in a carrier wave that represents the computer codes.

3 Detailed Description of Invention

1. Field of Invention

The invention relates generally to the management of dynamically allocated memory in a computer system. More particularly, the invention relates to tracking references between separate sections of memory associated with a computer system such that automatic storage-reclamation may be performed locally.

2. Description of the Relevant Art

The amount of memory associated with a computer system is typically limited. As such, memory must generally be conserved and recycled. Many computer programming languages enable software developers to dynamically allocate memory within a computer system. Some programming languages require explicit manual deallocation of previously allocated memory, which may be complicated and prone to error. Languages which require explicit manual memory management include the C and C++ programming languages. Other programming languages utilize automatic storage-reclamation to reclaim memory that is no longer necessary to ensure the proper operation of computer programs which allocate memory from the reclamation system. Such automatic storage-reclamation systems reclaim memory without explicit instructions or calls from computer programs which were previously utilizing the memory.

In object-oriented or object-based systems, the typical unit of memory allocation is commonly referred to as an object or a memory object, as will be appreciated by those skilled in the art. Objects which are in use are generally referred to as "live" objects, whereas objects which are no longer needed to correctly execute computer programs are typically referred to a "garbage" objects. The act of reclaiming garbage objects is commonly referred to as garbage collection, while an automatic storage-reclamation system is often referred to as a garbage collector. Computer programs which use automatic storage-reclamation systems are known as mutators due to the fact that such computer programs can change live memory objects during execution. Computer programs written in languages such as the Java™ programming language (developed by Sun Microsystems, Inc. of Palo Alto, California) and the Smalltalk programming language use garbage collection to automatically manage memory.

Objects typically contain references to other objects. As such, an area of computer memory which is managed by a garbage collector will generally contain a

set of objects which reference one another. Figure 1 is a diagrammatic representation of an area of computer memory which contains objects. A managed area of memory 10, which is typically a heap associated with a computer system, includes objects 20. In general, an object 20 may be referenced by other objects 20. By way of example, object 20a has a pointer 24a to object 20b. Object 20c also has a pointer 24b to object 20b. As such, object 20b is referenced by both objects 20a and 20c.

A number of external references into memory 10. As shown, a fixed root 30 which is external to memory 10 includes pointers 34 to objects, *e.g.*, objects 20a and 20c, located in memory 10. All objects, as for example objects 20a-d, which may be reachable by following references from fixed root 30 are considered to be live objects. Alternatively, object 20e, which is not reachable by following references from fixed root 30, is characterized as a garbage object.

Garbage collectors are typically implemented to identify garbage objects such as object 20e. In general, garbage collectors may operate using a number of different algorithms. Conventional garbage collection algorithms include reference counting collectors, mark sweep collectors, and copying collectors. As will be appreciated by those skilled in the art, during garbage collection, when objects 20 are moved, references to objects 20 must be adjusted accordingly.

It is often beneficial to separate a managed memory area into smaller sections to enable garbage collection to be performed locally in one area at a time. One memory partitioning scheme is generational garbage collection, in which objects are separated based upon their lifetimes as measured from the time the objects were created. "Younger" objects have been observed as being more likely to become garbage than "older" objects. As such, generational garbage collection may be used to increase the overall efficiency of memory reclamation.

Figure 2 is a diagrammatic representation of an interface between a root and memory which is partitioned into a new generation and an old generation. A memory 110, which is typically a heap that is associated with a computer system, includes a new generation 110a and an old generation 110b. A fixed root 114, or a global object which references objects within either or both new generation 110a and old generation 110b, includes pointers 116 to objects 120 in new generation 110a, as shown. Root 114 may be located on a stack, as will be appreciated by those skilled in the art.

Some objects 120 within new generation 110a, as for example object 120a, may also be considered as roots, since object 120a is assumed to be live and includes a pointer 122 to another object 120d. When new generation object 126 is live and points to old generation object 128, garbage collection performed in old generation 110b does not generally "collect" object 128. However, if new generation object 126 is dead, a garbage collection performed in new generation 110a will result in old generation object 128 becoming unreachable, since old generation object 128 will not be pointed to by any other object. If old generation object 128 is unreachable, then garbage collection performed in old generation 110b will result in the collection of old generation object 128. It should be appreciated that pointer 130, which points between new generation object 126 and old generation object 128 is considered to be an inter-generational pointer, since pointer 130 spans both new generation 110a and old generation 110b. When pointer 130 points from new generation object 126 to old generation object 128, old generation object 128 is considered to be tenured garbage, as old generation object 128 is not collectable using new generation garbage collection.

Another memory partitioning scheme involves separating memory into smaller areas in order to reduce the amount of time required for a single garbage collection to be performed. Pauses caused by garbage collection often tend to disrupt an associated mutator and are, therefore, undesirable. In some systems,

the garbage collector may be able to provide a guaranteed small maximum pause duration. Such garbage collectors associated are known as real-time garbage collectors. In other systems, the garbage collector may attempt to keep pause times small, but may fail to do so in some situations. Garbage collectors which attempt to keep pause times small are known as non-disruptive or incremental garbage collectors.

In order to operate on an individual memory area, a garbage collector must have knowledge of all references into that area. References into an area are referred to as roots for that area. It should be appreciated that roots may include both external references, *e.g.*, fixed roots, and references from other areas of computer memory. Accordingly, garbage collectors generally provide mechanisms for finding and tracking roots, or references.

One method of locating references into a memory area involves scanning through all objects in memory. For most systems, scanning through all objects in memory is prohibitively time-consuming. As such, a more elaborate tracking scheme is often required.

Whenever a mutator stores a reference into an object, additional processing may be implemented in order to track references for garbage collection purposes. This additional processing is known as a write barrier or store check. In order for efficiency of the mutator to be maintained at an acceptable level, the costs associated with the write barrier must be kept as low as possible.

One way of tracking references into a memory area involves maintaining a set which holds all roots for the area. Such a set is generally known as a remembered set for the area. The associated write barrier will detect when a reference into an area is stored. Accordingly, the write barrier will insert the location of the reference into the remembered set associated with the area.

Figure 3 is a diagrammatic representation of pointers between objects in a new generation and objects in an old generation which are tracked using a remembered set. A memory 302 is divided into a new generation 302a and an old generation 302b. A remembered set 304 is used to track pointers 314 which point from old generation objects 310 to new generation objects 312. The address of old generation object 310a is stored in remembered set 304, as old generation object 310a includes pointer 314a to new generation object 312b. Similarly, the address of old generation object 310b, which includes pointers 314b and 314c to new generation objects 312b and 312a, respectively, is also stored in remembered set 304.

Locating roots for garbage collection is straightforward when a remembered set is used, since the remembered set will contain all of the roots. However, the use of a write barrier is often expensive, as excess memory may be required. Also, when a new location is to be inserted into a remembered set, it is possible that the particular location may already be present within the remembered set. Checking the remembered set for duplicate locations prior to inserting a location is expensive. On the other hand, eliminating a check for duplicate locations may cause the remembered set to grow unnecessarily large. As will be appreciated by those skilled in the art, there is generally no upper bound on the number of duplicates which a remembered set may hold. When a reference to a location is to be stored, the location often already contains a previous reference. As a result, a remembered set entry that is associated with the location prior to a storage operation will generally become invalid following the storage operation. Removing an old entry may prove to be a costly operation in some situations, whereas leaving an old entry in place may result in the occupation of excess memory by a remembered set.

Another scheme which is often used for tracking references into a memory area is known as card marking. In general, card marking involves conceptually dividing memory into relatively small parts called cards. A garbage collector will then allocate an array of bits with one entry per card. When a reference is stored, the write barrier will compute the corresponding card array entry and set the associated bit. This process is known as "dirtying" the card. It should be appreciated that for efficiency reasons, a byte or a word array are often used in lieu of a bit array.

One advantage of using card marking is that the write barrier is relatively cheap. Another advantage of using card marking is that the amount of memory required for the card array is fixed. However, the processing required for locating roots at garbage collection time is often significant, *e.g.*, more processing is required than would be for a system which utilizes a remembered set. The garbage collector only knows approximately where reference stores have occurred. That is, the garbage collector only knows where the card marking array has dirty entries. Once a dirty entry is identified, the corresponding cards must be scanned for roots. Although scanning a card for roots is generally much cheaper than scanning an entire memory, scanning the card is still often costly. As will be understood by those skilled in the art, when a garbage collector locates a root, the corresponding card array entry must be kept dirty in order for the root to be located the next time garbage collection is invoked.

A combined scheme may use remembered sets and card marking. A write barrier will perform card marking as described above. However, at garbage collection time, the garbage collector will construct remembered sets for each card. When garbage collection is completed, the card marking array may then be cleared. Using a combined remembered set and card marking scheme reduces the amount of scanning required for subsequent garbage collections, thereby increasing the overall efficiency of garbage collection processes. However, the implementation of such

schemes is often complicated. Therefore, what is desired is a method and an apparatus for efficiently implementing a combined remembered set and card marking scheme.

SUMMARY OF THE INVENTION

The present invention relates to methods and apparatus for performing generational garbage collection within computer memory. According to one aspect of the present invention, a computer-implemented method for dynamically managing memory which includes a first memory section and a second memory section that is divided into a plurality of blocks each having an associated marker, includes performing a first garbage collection on the first memory section. The method also includes performing a second garbage collection on a selected one of the blocks in the second memory section. A third garbage collection is performed on the selected block in the second memory section. The third garbage collection includes determining whether the selected block includes a first object which references a second object which is not included in the selected block based at least in part on a status indicated by the marker associated with the selected block. The status includes an indication of whether the reference to the second object was stored after the second garbage collection was performed, and if the reference to the second object was stored after the second garbage collection was performed, a new root array is created using the selected marker.

In accordance with another aspect of the present invention, a computer-implemented method for allocating a selected object in computer memory involves determining whether a first section of the memory is suitable for the selected object to be allocated, and allocating the selected object when it is determined that the first section is suitable for the object to be allocated. The method also involves performing a garbage collection in the first section when it is determined that the first section is not suitable for the selected object to be allocated. Performing the

garbage collection in the first section includes scanning an array of words to locate a selected word that is arranged to indicate that a first root associated with the word references an object which already exists in the memory.

In accordance with still another aspect of the present invention, a computer system includes a memory arranged as a first memory section and a second memory section, where the second memory section is divided into a plurality of blocks. Such a computer system also includes a processor that is coupled to the memory, and a first garbage collector which is associated with the first memory section. A second garbage collector associated with the second memory section is arranged to perform a garbage collection on a selected block which has an associated marker that is arranged to indicate whether the selected block includes a first object which references a second object that is not included in the selected block. The selected markers is associated with a root arrays which hold address of the object when the object references the second object that is not in the selected block. In one embodiment, the second garbage collector is arranged to use the marker to identify whether the second object is in the first memory section.

These and other advantages of the present invention will become apparent upon reading the following detailed descriptions and studying the various figures of the drawings.

DETAILED DESCRIPTION OF THE EMBODIMENTS

The invention, together with further advantages thereof, may best be understood by reference to the following description taken in conjunction with the accompanying drawings.

Garbage collection is used to dynamically allocate computer memory for use by a computer program. In general, garbage collection causes pauses in the execution of the program. One apparatus for reducing the pause-times associated

with garbage collection is to divide the memory into a plurality of generations. By way of example, in a two generation memory structure, the memory may be divided into a new generation, which includes newly allocated objects, and an old generation, which includes older objects. It should be appreciated that, newly allocated objects tend to die more quickly than older objects. As such, garbage collection may be performed more often in the new generation than in the old generation. Typically, the new generation is relatively small compared to the overall size of the memory. Accordingly, garbage collection within the new generation may typically be performed without causing substantial interruptions during the execution of a program.

While garbage collection in the new generation may not result in significant pause-times, garbage collection in the old generation may still cause significant pauses during the execution of a program, since the old generation is typically larger than the new generation. Further, if inter-generational pointers from objects in the old generation to objects in the new generation exist, then the inter-generational pointers are often tracked while a program executes. The inter-generational pointers are tracked since objects in the old generation that are associated with such pointers are considered to be roots of the new generation. The tracking of the pointers, or references, from objects in the old generation to objects in the new generation is often complicated and, therefore, time-consuming.

By dividing old generation memory into smaller areas, or blocks, pause-times associated with old generation garbage collection may be reduced. Old generation garbage collection may be performed in a specific block of old generation memory each time old generation garbage collection is performed. By limiting the blocks in which old generation garbage collection is performed, and by collecting garbage in different blocks each time old generation garbage collection is performed, the efficiency of the old generation garbage collection may be enhanced.

As previously mentioned, old generation memory is divided into blocks to facilitate old generation garbage collection. Each time old generation garbage collection is performed, the old generation garbage collection is performed on any suitable block. That is, old generation garbage collection may be performed incrementally. In one embodiment, garbage collection may be performed on the oldest block in which garbage collection has not been performed. In another embodiment, garbage collection may be performed on the block in which garbage collection has been performed least recently.

With reference to Figure 4a, the division of memory into blocks within an old generation will be described in accordance with an embodiment of the present invention. An old generation 404 includes blocks 408 of memory. The blocks of memory are typically allocated on an as-needed basis. That is, additional blocks are allocated when substantially all existing blocks 408 are full. Blocks 408, which contain objects associated with a particular program, are often referred to as "cars." Blocks or cars 408 are arranged in linked sets which are known as "trains" 412. For example, train 412a includes cars 408a, 408b, while train 412b includes cars 408c, 408d, 408e, and train 412c includes cars 408f and 408g.

Cars 408 within trains 412 are generally ordered based upon when a particular car 408 was added to a particular train 412. For example, within train 412a, if car 408b is added to train 412a after car 408a, car 408a is considered to be a lower car in the same train as car 408b. Similarly, trains 412 are generally also ordered based upon when a particular train 412 is created. As shown, if train 412b is added to memory 404 after train 412c, then train 412c is a lower train with respect to train 412b and, therefore, cars 408c, 408d, 408e, within train 412b.

An algorithm which uses trains 412 to perform garbage collection within old generation 404 typically collects a set number of cars 408 at a time. In the described embodiment, only a single car 408 is collected during each old generation

garbage collection, although it should be appreciated that any suitable number of cars may be collected during each old generation garbage collection. By collecting one car 408 at a time, the overall length of old generation garbage collection, and, therefore, the pause-times associated with old generation garbage collection is essentially bounded. Hence, the lengthy pause-times that are typically associated with old generation garbage collection may be reduced by collecting only a set number of cars 408 during each old generation garbage collection.

In general, in order to perform garbage collection in cars 408, all pointers which either originate in, or access objects within, each car 408 in old generation memory are tracked. One method for tracking pointers will be described below with respect to Figure 4b. When a particular car 408 which is to be collected includes a live object, the object is copied into a train 412 which either points to or is pointed to by the object. Then, once the copy of the object is made, the "original" object is collected or reclaimed. In general, when a selected train 412 no longer has pointers outside of itself, the selected train 412 may be eliminated, *i.e.*, the memory allocated to the selected train 412 is freed. Similarly, when a selected car 408 no longer has pointers outside of itself, the selected car 408 may be eliminated.

In the described embodiment, the size of cars 408 within a given train 412 is fixed. That is, all cars 408 may be of substantially of the same size. Therefore, since a single car 408 may not have enough space to accommodate linked objects, an object 416a in one car 408, *e.g.*, car 408f, may be linked to an object 416b in a second car 408, *e.g.*, car 408g. During an old generation garbage collection, objects 416a, 416b are likely to survive, since objects 416a, 416b are in separate cars 408, and reference each other. As such, an old generation garbage collection may not result in the collection of cars 408f, 408g. Hence, memory associated with cars 408f, 408g will not generally be freed unless pointers between cars 408f, 408g within train 412c are tracked.

In general, the length of trains 412, as well as the size of cars 408 may be widely varied. The size of cars 408 may depend on factors which include, but are not limited to, the size of old generation 404, the speed of the garbage collection algorithm, and the speed of the computer running the garbage collection algorithm. By way of example, car sizes on the order of approximately 20 kilobytes of memory to approximately 100 kilobytes of memory work well in current systems. In the described embodiment, cars 408 include approximately 64 kilobytes of memory.

Cars 408 may generally be divided into cards 420 which may be used to facilitate old generation garbage collection performed on cars 408, as will be described below with respect to Figure 4b. Cards 420, like cars 408, may take on any suitable size, although cards 420 may often include approximately 100 to approximately 1000 bytes. For example, for cars 408 which include approximately 64 kilobytes of memory, cards 420 may include approximately 512 bytes.

The efficiency of tracking inter-generational pointers which point from old generation objects to new generation objects may be improved by providing storage, or markers, that are associated with the different areas within the old generation. In one embodiment, a marker is a word that may include a flag which is set to indicate whether an associated portion of a particular area includes a pointer into an object in the new generation. The use of such words provides an efficient structure which may be used to track inter-generational pointers from objects in the old generation to objects in the new generation. Although a marker is described as being a word, it should be appreciated that a marker may be any suitable storage type, as for example bits, bytes, and the like.

In order to track inter-generational pointers from objects associated with cards in old generation memory to objects in new generation memory, cards may be provided with "tracking structures." The tracking structures, or card marks, may be used to identify whether inter-generational pointers exist for a card, and also

which objects within the card include the pointers. Figure 4b is a diagrammatic representation of an array of card marks and an associated pool of root arrays in accordance with an embodiment of the present invention. A root array is gonerally a small array which contains root locations which are specified as offsets relative to a card. In other words, a root array is essentially a small, remembered set. An array 450 of card marks 452 includes pointers 456 to root arrays 460 contained in a pool 464 of root arrays 460. Card marks 452 are generally associated with a car within a train. Specifically, a car within a train may be divided into a number of cards that hold old generation objects. As such, a car within a train may be associated with many card marks 452. A grouping of card marks 452, which may or may not include all card marks 452 associated with a car, is considered to be an array 450 of card marks 452. In the described embodiment, array 450 includes all card marks 452 associated with the old generation.

In the described embodiment, a card mark 452, as for example card mark 452a, is a 32-bit word, although it should be appreciated that card mark 452a may generally be a word of any suitable length. Alternatively, the data structure that constitutes the card mark may be divided into a number of components. Although the bits which make up card mark 452a may be assigned in any manner that is appropriate to a particular application, in one embodiment, the lowest bits, or least significant bits, of card mark 452a are used as flags which essentially identify the "status," or overall condition, of card mark 452a. A lowest bit 468 of card mark 452a is a "dirty" flag. That is, lowest bit 468 is generally arranged to indicate whether card mark 452a or, more specifically, a card (as shown in Figure 4a) associated with card mark 452a, is "dirty." Dirty cards are cards where pointers have been stored since the last garbage collection. Such pointers may include, but are not limited to, an inter-generational pointer which points from old generation memory into new generation memory, a pointer to a lower train, and a pointer to a lower car in the same train that is associated with card mark 452a. When lowest bit

468 is set, *i.e.*, when lowest bit 468 is set to "0," the indication is that card mark 452a is dirty.

A second lowest bit 470 of card mark 452a is a new generation flag, and is used to indicate whether card mark 452a includes an inter-generational pointer to a new generation. When second lowest bit 470 is set, *i.e.*, set to "0", the indication is that card mark 452a includes an inter-generational pointer to a new generation. A third lowest bit 472 is a lower train flag in the described embodiment. The lower train flag is arranged to indicate whether card mark 452a has a pointer into a lower train. When the lower train flag, or third lowest bit 472, is set, the indication is that card mark 452a includes a pointer into a lower train. A fourth lowest bit 474 is a same train flag that is arranged to indicate whether card mark 452a includes a pointer into a lower car in the same train.

In the described embodiment, in order for card mark 452a to be considered clean, card mark 452a generally may not include a pointer which points from an old generation to a new generation, a pointer into a lower train, or a pointer into a lower car of the same train. As such, lowest bit 468, second lowest bit 470, third lowest bit 472, and fourth lowest bit 474 all have values of "1" in the event that card mark 452a is clean. In other words, the lowest four bits of card mark 452a are cleared when card mark 452a is clean. Therefore, as shown, card marks 452a, 452b are clean, whereas card mark 452c, which has a lowest bit that is set, is dirty.

The remaining twenty-eight bits in card mark 452a may all be allocated for use as a pointer that points to an associated root array 460 which essentially holds addresses of pointers associated with card mark 452a. Alternatively, as for example in the described embodiment, card mark 452a includes a 27-bit pointer 478 and a reserved bit 480. 27-bit pointer 478 identifies pointer 456a which points from card mark 452a into root array 460a. Root array 460a is often either made up of eight words or sixteen words, although the number of words in root array 460a

may be widely varied. Root arrays 460 are generally arranged to hold references to roots. By way of example, root array 460a holds roots associated with card mark 450a and, hence, a card (as shown in Figure 4a) that is associated with card mark 450a.

When a suitable root array 460 is full, then a "root array overflow" is said to occur. When too many roots are to be stored in a given root array 460, the roots are no longer tracked. A root array overflow generally occurs when the volume of pointers to root arrays 460 in pool 464 is excessive with respect to the root arrays 460 available for allocation in pool 464. As a result, when performing garbage collection, the pointers in with the card associated with the root array overflow are then typically searched to identify roots. When a root array overflow occurs, 27-bit pointer 478 is set to null. That is, the twenty-seven bits in 27-bit pointer 478 are set to "0."

Reserved bit 480 may be used for any number of suitable purposes which may or may not be directly related to garbage collection processes. Suitable purposes include, but are not limited to, using reserved bit 480 to indicate the age of card mark 452a. It should be appreciated that additional reserved bits may also be included in card mark 452a by reducing the number of bits associated with the pointer in card mark 452a, *e.g.*, 27-bit pointer 478.

Card marks are used in conjunction with a garbage collection process to track cards within a car which include inter-generational pointers to objects in a new generation. In one embodiment, during the execution of a computer program, the card marks may be updated to enable the card marks to remain substantially current. Then, during a garbage collection, the card marks may be checked to identify cards with inter-generational pointers.

When card marks are used to facilitate a garbage collection process during the execution of a computer program, the card marks are generally both searched and updated to identify objects referenced by the card marks. Referring next to Figure 5, the steps associated with executing a program which uses garbage collection will be described in accordance with an embodiment of the present invention. Prior to executing a program, a card array that is associated with the program is initialized in step 502. In one embodiment, a card array, which is associated with a car, includes card marks, or references to card marks, associated with objects used by a program, as mentioned above with respect to Figure 4b. As such, a card array is generally used to track objects used in the program. After the card array is initialized, the program is executed in step 503 until it is desired either to allocate an object or to store a pointer for an object. Allocating an object generally involves assigning memory to an object, whereas storing a pointer for an object involves storing a pointer to another object within a first object.

During execution, there will periodically be instructions to store a pointer. When a pointer is to be stored, as represented by step 504, in step 512, an entry in the card array which corresponds to the object whose pointer is to be stored is identified. Once the card array entry is identified, the card array entry is marked as dirty in step 514. Marking the card array entry, *i.e.*, card mark, as dirty involves setting the dirty flag of the entry, i.e., lowest bit 468 of entry 452a as was described above with respect to Figure 4b. After the card mark is marked as dirty, the pointer is stored in step 516 using any suitable method. Once the pointer is written, process flow returns to step 503 where the program continues to execute. When the program terminates, any re-execution of the program will begin again at step 502 where an array of card marks is initialized.

Execution also generally provides instructions to allocate an object. In one embodiment, returning to step 504, when an object is to be allocated, a determination is made in step 506 as to whether enough new generation memory is

in existence for the object to be allocated. If it is determined in step 506 that there is enough new generation memory for use in allocating an object, then an object is allocated in step 508, and process flow returns to step 503 where a determination is made regarding whether there is a pointer to be stored.

If the determination in step 506 is that there is insufficient new generation memory for an object to be allocated, then process flow proceeds to step 510 where garbage collection is performed. During garbage collection, new generation memory, and possibly old generation memory, may be cleaned to release sections of new generation memory such that an object may be allocated. Although it should be appreciated that any suitable garbage collection method may be used, one particularly suitable garbage collection method will be described below with respect to Figure 6. After garbage collection is performed in step 510, process flow returns to step 506 where a determination is made regarding whether garbage collection has provided enough new generation memory for an object, *i.e.*, the object whose allocation was deemed necessary in step 503, to be allocated.

With reference to Figure 6, the steps associated with performing garbage collection will be described in accordance with an embodiment of the present invention. That is, step 510 of Figure 5 will be described. Garbage collection may be performed in both new generation memory and old generation memory to "free up" enough memory space to enable an object to be allocated. If the system on which garbage collection is to be performed is a multi-threaded system, then the threads are synchronized in step 602 using any suitable method. Once any threads which require synchronization are synchronized, garbage collection is performed within the new generation memory in step 604. The steps associated with one method of performing such a new generation garbage collection will be described below with reference to Figure 7a.

After the new generation garbage collection is performed in step 604, process flow proceeds to step 606 where a determination is made regarding whether it is necessary to perform garbage collection for old generation memory. In the described embodiment, old generation garbage collection is performed periodically. That is, after predetermined amounts of time have elapsed, old generation garbage collection is performed. In other embodiments, however, different or additional criteria may be used in the determination of whether old generation garbage collection is needed.

If it is determined that old generation garbage collection is needed, then old generation garbage collection using a card marking scheme is performed in step 608. Although methods associated with garbage collection performed on old generation memory using a card marking scheme may be widely varied, one suitable old generation garbage collection method will be described below with respect to Figures 8a and 8b.

Once old generation garbage collection is completed in step 608, the overall process of performing garbage collection to enable an object to be allocated is completed. Therefore, process flow proceeds to step 506 of Figure 5, which is the determination of whether enough new generation memory is available for an object to be allocated. Similarly, if the determination in step 606 is that no old generation garbage collection is needed, process flow also proceeds to step 506 of Figure 5.

Figure 7a is a process flow diagram which illustrates the steps associated with a new generation garbage collection, *i.e.*, step 604 of Figure 6, in accordance with an embodiment of the present invention. In step 701, fixed roots are followed. As previously mentioned, fixed roots are roots, *e.g.*, live objects on a stack, which directly point into the new generation memory or the old generation memory which is being cleaned through garbage collection. Following fixed roots typically entails transitively following references of the roots. The actual steps associated with

following roots, fixed or otherwise, will be described below with respect to Figures 7b-7e.

After the fixed roots are followed, the card array is scanned in step 702 to locate the next entry in the card array with either or both a dirty flag or a new generation flag that is set. As previously described, in one embodiment, "setting" a bit refers to assigning a value of "0" the bit, whereas "clearing" a bit refers to assigning a value of "1" the bit. In step 703, a determination is made regarding whether an entry, or a card mark, with either or both a new generation flag or a dirty flag that is set has been found. If such an entry has been found, then process flow proceeds to step 704 where it is determined whether the entry is dirty.

If the determination in step 704 is that the entry is dirty, then the card associated with the entry is marked as clean in step 707. It should be appreciated that marking a card as clean implies marking the card mark associated with the card as clean. After the card is marked as clean in step 707, process flow proceeds to step 708 where all objects in the card are scanned to locate roots which are then followed. As previously mentioned, the steps associated with following the roots will be discussed with reference to Figures 7b-7e below. Once the roots are followed, process flow returns to step 702 where the card array is scanned to locate the next entry, *i.e.*, card mark, with either or both a dirty flag or a new generation flag that is set.

If the determination in step 704 is that the entry is not dirty, then the entry has a new generation flag that is set. In other words, the entry includes an inter-generational pointer. If the entry is not dirty, process flow moves from step 704 to step 706 where a determination is made regarding whether the root array associated with the entry has overflowed. An overflowed root array is a root array which does not have include enough space to accept the insertion of an additional root. If it is determined that the root array associated with the entry is overflowed,

then process flow moves to step 707 where the card associated with the entry is marked as clean.

From step 714, process flow moves to step 718 in which the block associated with the entry is scanned, and the roots associated with the block are followed. Then, process flow returns to step 702, which is the step of scanning the card array to look for the next entry in the card array with the lowest bit set to zero.

When a suitable entry, that is, an entry with the lowest bit set to zero, is not found in step 708, then the roots within the new generation memory are followed until all copied objects have been scanned in step 710. Once all copied objects have been scanned, the new generation garbage collection process is completed.

In general, garbage collection involves following roots, as previously mentioned. Referring next to Figure 7b, the steps associated with following a single root will be described in accordance with an embodiment of the present invention. The process begins with a determination in step 720 of whether the root points into a memory area in which garbage collection is occurring. If it is determined that the root does not point into an area that is being garbage collected, then the process of following the root is completed. On the other hand, if the determination in step 720 is that the root does indeed point into an area in which garbage collection is occurring, then, in step 721, a determination is made as to whether the header field of the card mark holds a forwarding pointer. That is, a determination is made regarding whether a new memory location is identified by a forwarding pointer associated with the card mark.

If the determination is that the header field does hold a forwarding pointer , then process flow moves from step 721 to step 722 where the root is updated to the new location identified by the forwarding counter. After the root is

updated, the card mark is updated accordingly in step 728. The steps associated with updating a card mark will be described below with reference to Figure 7c. Once the card mark is updated, then the process of following a root is completed.

Returning to step 721, if it is determined that the header field does not hold a forwarding pointer, then the object identified by the root is copied to a new location, and a forwarding pointer is inserted in the header of the object in step 724. The forwarding pointer identifies the new location of the object. When the forwarding pointer has been inserted in the header, the root is updated to the new location in step 726. Then, in step 728, the associated card marking is updated, and the process of following a root is completed.

With respect to Figures 7c-7e, the steps associated with updating a card mark, *i.e.*, step 728 of Figure 7b, will be described in accordance with an embodiment of the present invention. In step 740, a determination is made as to whether the pointer points from the old generation to the new generation. If the pointer does point from the old generation to the new generation, then in step 746, it is determined whether the new generation flag is set to indicate that there is a pointer from the old generation to the new generation.

In step 752, a determination is made regarding whether the root array has overflowed when it is determined in step 746 that the new generation flag is set. If the root array is overflowed, then the process of updating a card mark is completed. If, however, the root array is not overflowed, then a determination is made in step 754 as to whether the root array is full. If it is determined that the root array is not full, process flow proceeds to step 750 in which the root, *i.e.*, the root that is being followed, is inserted into the root array, and the process of updating a card mark is completed. If the root array is determined to be full in step 754, then process flow moves to step 755 where the card mark is set to indicate that

there is an overflow of the root array. After the card mark is set, the card mark update process is completed.

Returning to step 746 and the determination of whether the new generation flag is set, when it is determined that the new generation pointer is not set, then in step 747, the new generation pointer is set to indicate that the pointer points from the old generation to the new generation. A root array is allocated and the card mark is set to point to the allocated root array in step 748. From step 748, process flow proceeds to step 749 which is the determination of whether the allocation of the root array was successful. If the allocation of the root array was successful, then the followed root is inserted in the root array in step 750. On the other hand, if the allocation of the root array was not successful, then process flow proceeds to step 755 where the card mark is set to indicate that the root array is overflowed. In one embodiment, setting the card mark to indicate that the root array is overflowed involves setting the pointer, *i.e.*, the 27-bit pointer, in the card mark to null.

If the determination in step 740 was that the pointer does not point from the old generation to the new generation, then process flow proceeds to step 742 which is the determination of whether there is a pointer which points to a lower train in the old generation. If it is determined that the pointer points to a lower train in the old generation, then a determination is made in step 760 as to whether the new generation flag is set to indicate that there is a pointer from the old generation to the new generation. If the indication is that the new generation flag is set, then process flow proceeds to step 775, which is the determination of whether the lower train flag is set. In the described embodiment, the lower train flag is the third lowest bit in the card mark, and indicates whether the pointer points into a lower train, as described above. If the determination is that the lower train flag is set, the process of updating the card mark is completed. Alternatively, if the determination is that the lower train flag is not set, then the lower train flag is set

in step 776. Once the lower train overflow flag is set, then the card mark update process is completed.

If it is determined in step 760 that the new generation flag is not set, then process flow moves to step 766 where it is determined whether the lower train flag is set. If the determination in step 766 is that the lower train flag is not set, then the lower train flag is set in step 767 to indicate the existence of a pointer to a lower train. Once the lower train flag is set, a root array is allocated and the card mark is set to point to the allocated root array in step 768. A determination is then made in step 769 regarding whether the allocation of the new root array was successful. If the allocation was successful, then in step 770, the followed root is inserted in the root array, in the event that the root is not already present in the root array. Then, the process of updating the card mark is completed. On the other hand, if the allocation of a new root array in step 769 was not successful, then process flow moves from step 769 to step 762 where the card mark is set to indicate a root array overflow. After the card mark is set to indicate a root array overflow, the process of updating the card mark is completed.

Returning to step 766, if the determination is that the lower train flag is set to indicate that there is a pointer to a lower train, then a determination is made in step 772 regarding whether the corresponding root array is overflowed. If the root array is overflowed, then the card mark is set to indicate a root array overflow in step 762. Alternatively, if the root array is determined not to be overflowed in step 772, then the followed root is inserted in the root array in step 770, if the root is not already present in the root array.

Referring back to step 742, which is the step of determining if a pointer points to a lower train in the old generation, if it is determined that a pointer does not point to a lower train in the old generation, then in step 744, a determination is made as to whether a pointer points to a lower car in the same train. If a pointer

does not point to a lower car in the same train, then the card mark update process is completed. If, however, the determination is that a pointer does point to a lower car in the same train, then process flow proceeds to step 780, which is the determination of whether the new generation flag is set to indicate that there is a pointer to a new generation.

If the indication in step 780 is that the new generation flag is set, then a determination is made in step 782 as to whether the same train flag is set. That is, a determination is made regarding whether there is a pointer into a lower car of the same train. If the same train flag is set, then the process of updating a card mark is completed. Alternatively, if the same train flag is not set, then the same train flag is set in step 783. Once the same train flag is set, then the process of updating a card mark is completed.

When it is determined in step 780 that the new generation flag is not set, then process flow proceeds to step 786 where a determination is made regarding whether the lower train flag of the card mark is set to indicate that there is a pointer to a lower train. If the lower train flag is set, then process flow proceeds to step 782 where a determination is made regarding whether the same train flag is set.

If the lower train flag is not set, or indicates that pointers to a lower train are not in existence, then process flow moves from step 786 to step 788 where a determination is made regarding whether the same train flag of the card mark is set. Step 788, in other words, is the determination of whether the card mark indicates that there is a pointer to a lower card of the same train. If it is determined that the same train flag is set, then in step 790, it is determined whether a root array associated with the card mark is overflowed. If the root array is overflowed, then the card mark is set to indicate that the root array is overflowed in step 793. Alternatively, if it is determined that the root array is not overflowed,

then, in step 792, the root is inserted in the root array in the event that the root is not already present in the root array. After the root is inserted in the block array, if necessary, the process of updating a card mark is completed.

Returning to step 788, if it is determined that the same train flag is not set, then a root array is allocated in step 794. Further, the card mark is set to point to the allocated root array. In step 796, it is determined whether the allocation of the root array was successful. If the allocation of the root array was not successful, then the card mark is set to indicate a root array overflow in step 782. On the other hand, if the allocation of the root array was successful, then process flow proceeds to step 792 where the root is inserted into the root array, if the root is not already present in the root array.

Figures 8a and 8b are process flow diagrams which illustrate the steps associated with performing garbage collection in old generation memory, *i.e.*, step 608 of Figure 6, in accordance with an embodiment of the present invention. In step 802, fixed roots or, in this embodiment, roots which directly point into old generation memory, are followed. The steps associated with following the fixed roots, according to an embodiment of the present invention, were described above with respect to Figures 7b-7e.

Roots from the new generation are followed in step 804. That is, the associations of roots which point from the new generation to the old generation are followed. Process flow moves from step 804 to step 806 in which the card array, or the array of card marks, is scanned in order to locate the next entry which has a lower train flag that is set. In step 808, it is determined whether such an entry, *i.e.*, an entry which has a lower train flag that is set, has been found. If it is determined that such an entry has been found, then a determination is made in step 812 regarding whether the entry that was found has either, or both, a new generation flag that is set or a root array which is overflowed. If either, or both, the new

generation flag is set or a root array is overflowed, then in step 814,, all the objects in the card are scanned for roots, and the roots are followed. Again, the steps associated with following a root were previously discussed with respect to Figures 7b-7e. After the roots are followed, process flow returns to step 806 where the card array is scanned to locate the next entry which has a lower train flag that is set.

If it is determined in step 812 that the entry, *i.e.*, card mark, that was found in step 808 does not have a new generation flag that is set or a root array that is overflowed, then process flow moves to step 816 where the root associated with the entry is scanned, and the roots associated with the root array are followed. After the roots are followed, the card array is scanned in step 806 for the next entry which has a lower train flag that is set.

Returning to step 808, if scanning the card array looking for an entry which has a lower train flag that is set results in no entry being found, then in step 820, the roots are followed within the old generation until all copied objects have been scanned. In one embodiment, objects in one train which are referenced from other trains are copied into those trains. When all copied objects have been scanned, a determination is made in step 830 regarding whether a root which points into the lowest train was encountered during the scanning process. If the determination is that a root into the lowest train was not encountered, then the entire lowest train is released in step 840. In other words, old generation memory held by the lowest train is freed. The entire lowest train may be freed due to the fact that if no pointers into the lowest train exist, the lowest train contains only garbage. It should be appreciated that cyclic structures which reference each other and are located in different cars of the same train may be collected when the entire lowest train is freed. Once the entire lowest train is freed, the steps associated with an old generation garbage collection are completed.

If it is determined in step 830 that a root into the lowest train was encountered, then in step 832, the card array is scanned to look for the next entry, *i.e.*, card mark, which has a same train flag that is set. In step 834, a determination is made regarding whether an entry with a same train flag that is set has been found. If the determination is that an entry with a same train flag that is set has not been found, then the roots are followed within the old generation until all copied objects have been scanned in step 836. Scanning all copied objects involves, in one embodiment, a transitive search for pointers.. Once all copied objects have been scanned, the lowest car in the lowest train is released in step 837, and an old generation garbage collection process is completed.

Returning to step 834, if the determination is that an entry, or card mark, with a same train flag that is set has been found, then process flow proceeds to step 838 where a determination is made regarding whether the entry has a new generation flag that is set, a lower train flag that is set, or a root array that is overflowed. If the entry has any of or all of a new generation flag that is set, then in step 850, all objects in the card are scanned for roots, which are followed. Once the roots are followed, process flow returns to step 832 where the card array is once again scanned to look for the next entry which has a same train flag that is set.

If the determination in step 838 is that the entry found in step 834 does not include a new generation flag that is set, a lower train flag that is set, or a root array that is overflowed, then the root array associated with the entry is scanned in step 856, and the roots in the root array are followed. After the roots are followed, process flow returns to step 832 where the card array is scanned to look for the next entry which has a same train flag that is set.

It should be appreciated that a computer program which uses inter-generational garbage collection in accordance with the present invention may be implemented on a variety of different computer systems. Figure 9 illustrates a

typical, general purpose computer system suitable for implementing the present invention. The computer system 930 includes any number of processors 932 (also referred to as contral processing units, or CPUs) that are coupled to memory devices including primary storage devices 934 (typically a read only memory, or ROM) and primary storage devices 936 (typically a random access memory, or RAM). As is well known in the art, ROM acts to transfer data and instructions uni-directionally to the CPU 932, while RAM is used typically to transfer data and instructions in a bi-directional manner. Both primary storage devices 934, 936 may include any suitable computer-readable media. A secondary storage medium 938, which is typically a mass memory device, is also coupled bi-directionally to CPU 932 and provides additional data storage capacity. The mass memory device 938 is a computer-readable medium that may be used to store programs including computer code, data and the like and is typically a storage medium such as a hard disk or a tape that are generally slower than primary storage devices 934, 936. Mass memory storage device 938 may take the form of a magnetic or paper tape reader or some other well-known device. It will be appreciated that the information retained within the mass memory device 938, may, in appropriate cases, be incorporated in standard fashion as part of RAM 936 as virtual memory. A specific primary storage device 934 such as a CD-ROM may also pass data uni-directionally to the CPU.

CPU 932 is also coupled to one or more input/output devices 940 that may include, but are not limited to, devices such as video monitors, track balls, mice, keyboards, microphones, touch-sensitive displays, transducer card readers, magnetic or paper tape readers, tablets, styluses, voice or handwriting recognizers, or other well-known input devices such as, of course, other computers. Finally, CPU 932 optionally may be coupled to a computer or telecommunications network, *e.g.*, an Internet network or an intranet network, using a network connection as shown generally at 912. With such a network connection, it is contemplated that the CPU 932 might receive information from the network, or might output information to the network in the course of performing the above-described method

steps. Such information, which is often represented as a sequence of instructions to be executed using CPU 932, may be received from and outputted to the network in the form of a computer data signal embodied in a carrier wave. The above-described devices and materials will be familiar to those of skill in the computer hardware and software arts.

Although only a few embodiments of the present invention have been described, it should be understood that the present invention may be embodied in many other specific forms without departing from the spirit or scope of the invention. By way of example, steps involved with new generation garbage collection and the old generation garbage collection may be reordered. Steps may also be removed or added without departing from the spirit or the scope of the present invention.

While generational garbage collection has been described as being performed in a new generation and an old generation of memory, generational garbage collection may be performed over many generations of memory. That is, generational garbage collection methods of the present invention may be performed on memory that is divided into multiple generations, *e.g.*, a new generation, an "intermediate generation," and an old generation, which are segregated by the age of objects within each generation. It should be appreciated that for embodiments in which there are multiple generations, an inter-generational pointer may generally point between any two generations.

The card mark has been described as being a 32-bit word which includes a 27-bit pointer, a reserved bit, a same train flag, a lower train flag, a new generation flag, and a dirty flag. However, it should be appreciated that the card mark may be varied without departing from the spirit of the scope of the present invention. For example, the card mark may include fewer than 32 bits or more than 32 bits, depending at least in part upon the particular requirements of a given system.

Alternatively, the bits within a card mark may also be widely varied. By way of example, in one embodiment, the 32-bits within a card mark may include a 26-bit pointer and two "status indicator" bits, or tag bits. The status indicator bits may be arranged such that different combinations of values for the status indicator bits indicate whether a card mark is dirty, clean, includes a new generation pointer, or does not include a new generation pointer. The card mark may also include a lower train flag which indicates whether there are any pointers to a lower train, a same train flag which indicates whether there are any pointers within a given train to a lower car in that train, a lower train overflow flag, and a same train overflow flag.

Further, although the lowest bits within a card mark are described as being flags which are used to indicate, for example, whether the card mark is dirty, as described above, it should be appreciated that the flags within a card mark may be located in any suitable position within the card mark. The bits which represent flags may be the highest bits within a card mark. Alternatively, the bits may be interspersed throughout a card mark.

Although the size of a car in old generation memory has been described as being fixed, it should be appreciated that, in one embodiment, the size of a car may be dynamically allocated. That is, the size of a car may be determined based upon the particular requirements of objects which are to be placed within the car. By way of example, the size of a car may be allocated during the course of garbage collection process to minimize the number of pointers which originate with objects within the car without departing from the spirit or the scope of the present invention.

It should be appreciated that conventional methods for garbage collection may occasionally be implemented within old generation memory. By way of example, in some cases, it may be possible for old generation memory to become full. When old generation memory is full, performing old generation garbage

collection on a car may not free up a sufficient amount of memory for immediate use. As such, a conventional garbage collection process, such as a mark sweep collection process, may be implemented to free as much old generation memory as possible in the event that the old generation memory is full without departing from the spirit or the scope of the present invention. Therefore, the present examples are to be considered as illustrative and not restrictive, and the invention is not to be limited to the details given herein, but may be modified within the scope of the appended claims along with their full scope of equivalents.

4 Brief Description of Drawings

Figure 1 is a diagrammatic representation of an area of computer memory which contains objects in accordance with prior art.

Figure 2 is a diagrammatic representation of an interface between a root and memory which includes a new generation and an old generation in accordance with prior art.

Figure 3 is a diagrammatic representation of a memory which is associated with a remembered set in accordance with prior art.

Figure 4a is a diagrammatic representation of an old generation memory which is segmented into trains in accordance with an embodiment of the present invention.

Figure 4b is a diagrammatic representation of an array of card marks and an associated pool of root arrays in accordance with an embodiment of the present invention.

Figure 5 is a process flow diagram which illustrates the steps associated with executing a computer program in accordance with an embodiment of the present invention.

Figure 6 is a process flow diagram which illustrates a process of performing a garbage collection, *i.e.*, step 510 of Figure 5, in accordance with an embodiment of the present invention.

Figure 7a is a process flow diagram which illustrates the steps associated with a garbage collection in new generation memory, *i.e.*, step 604 of Figure 6, in accordance with an embodiment of the present invention.

Figure 7b is a process flow diagram which illustrates the steps associated with following a single root in accordance with an embodiment of the present invention.

Figures 7c-7e are a process flow diagram which illustrates the steps associated with updating a card mark, *i.e.*, step 728 of Figure 7b, in accordance with an embodiment of the present invention.

Figures 8a and 8b are a process flow diagram which illustrates the steps associated with performing an old generation garbage collection, *i.e.*, step 608 of Figure 6, in accordance with an embodiment of the present invention.

Figure 9 is a diagrammatic representation of a computer system suitable for implementing the present invention.

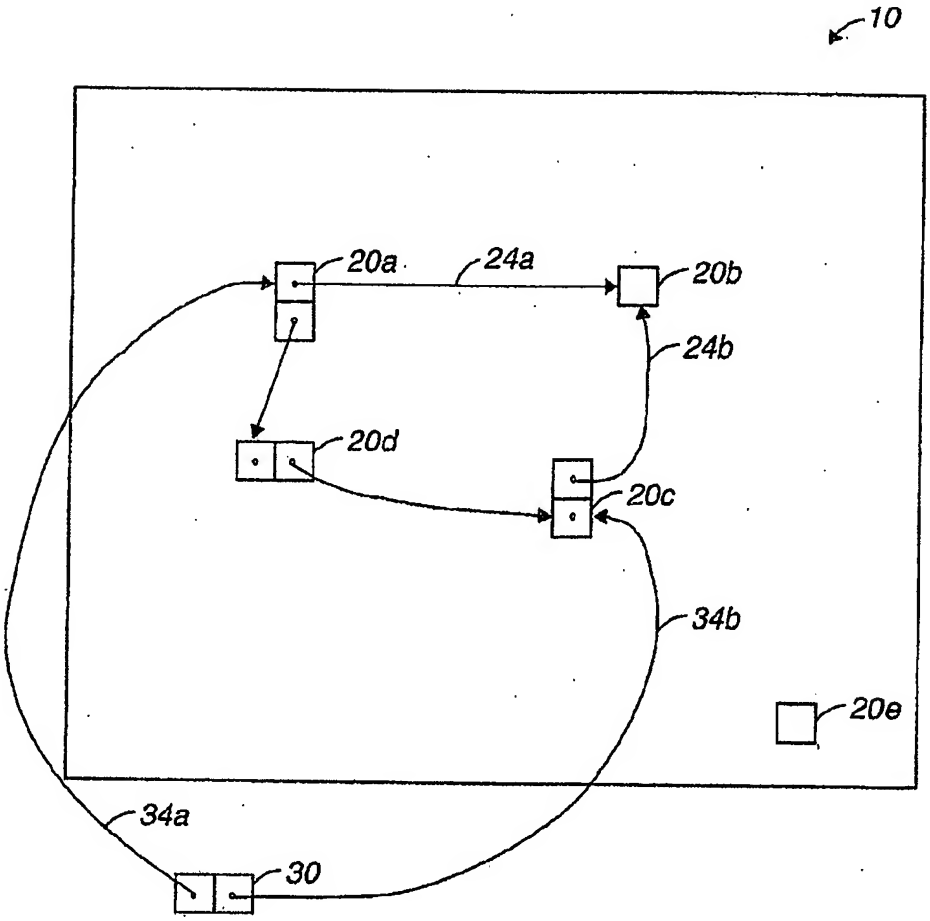


Figure 1

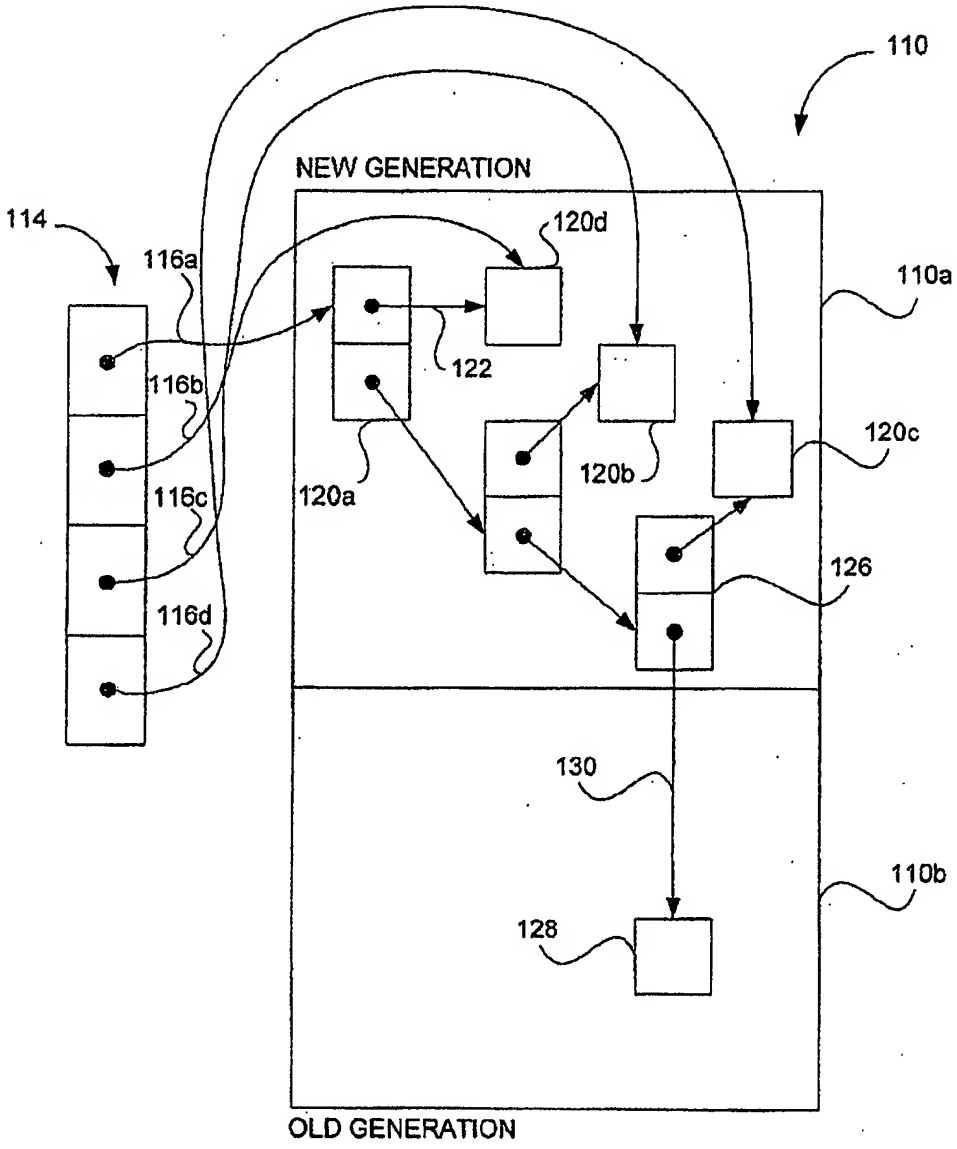

110
NEW GENERATION
114
116a
120d
110a
122
116b
120c
120a
120b
116c
126
116d
130
110b
128
OLD GENERATION

Figure 2

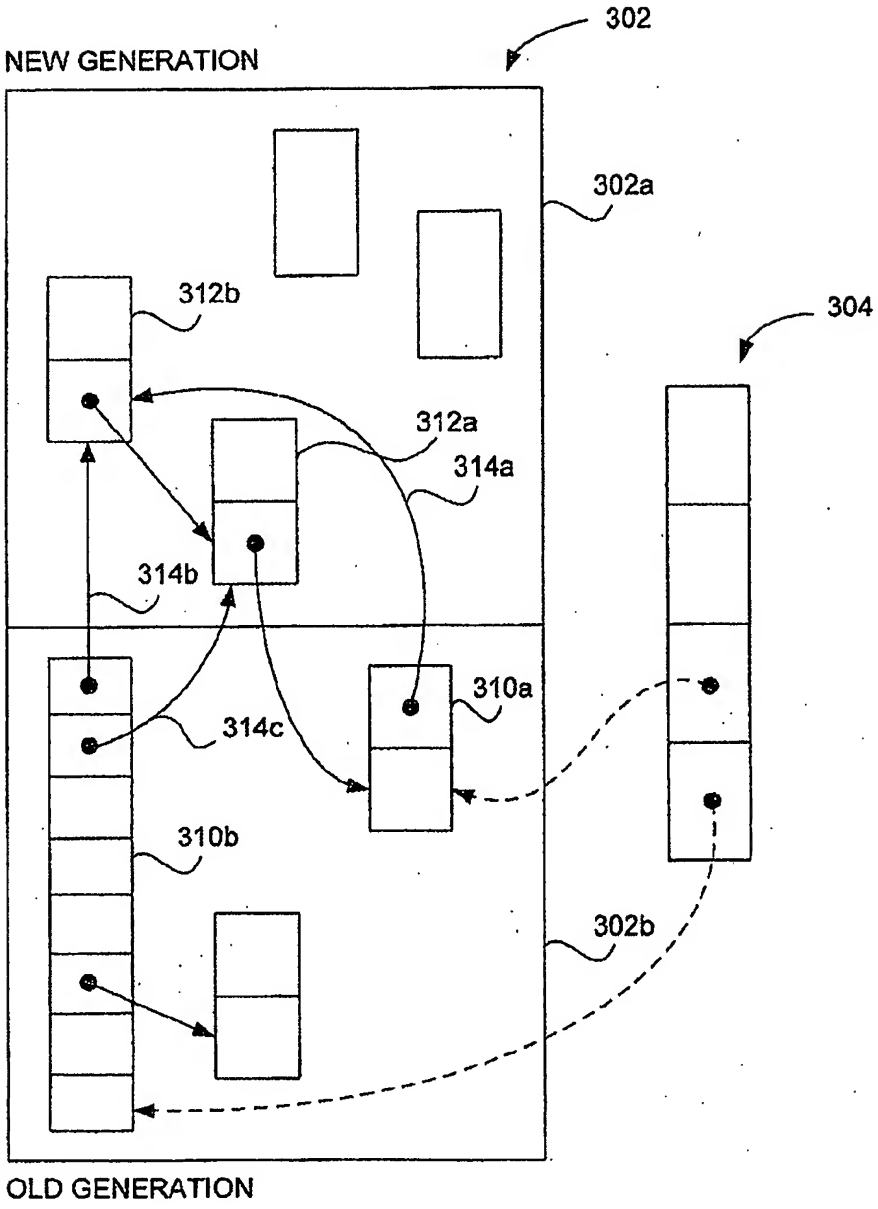

302
NEW GENERATION
302a
312b
304
312a
314a
314b
310a
314c
310b
302b
OLD GENERATION

Figure 3

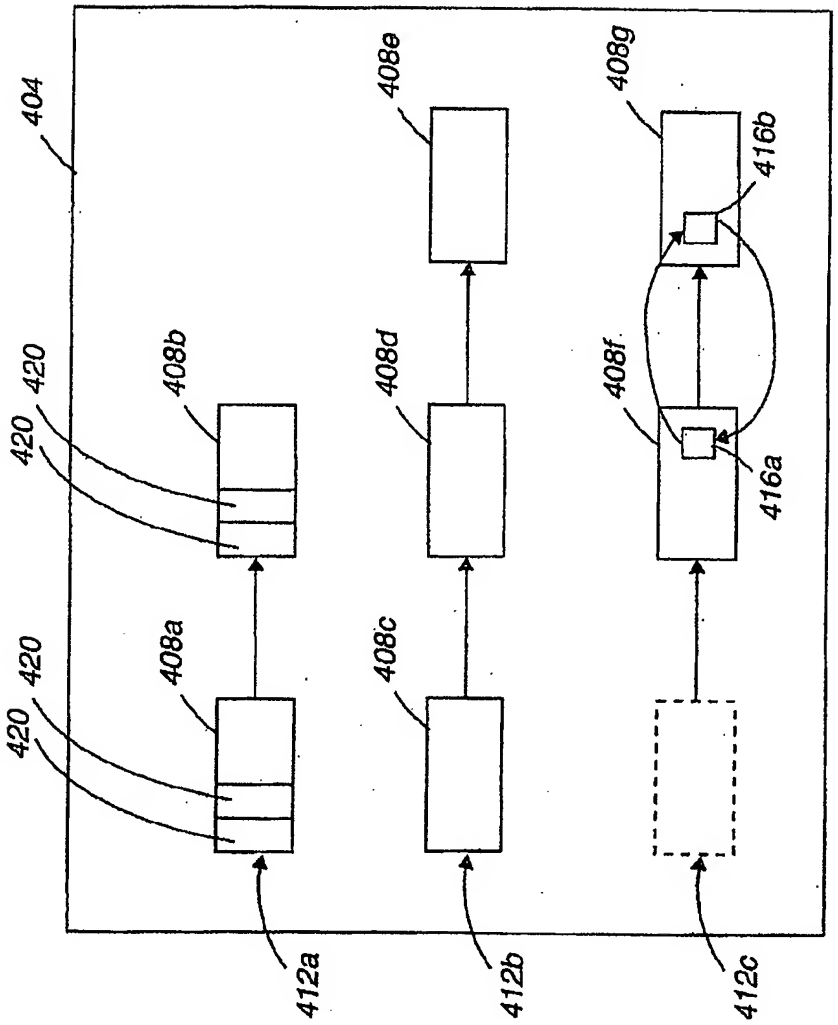

404
408e
408g
416b
420
420
408b
408d
408f
420
420
408a
408c
416a
412a
412b
412c

Figure 4a

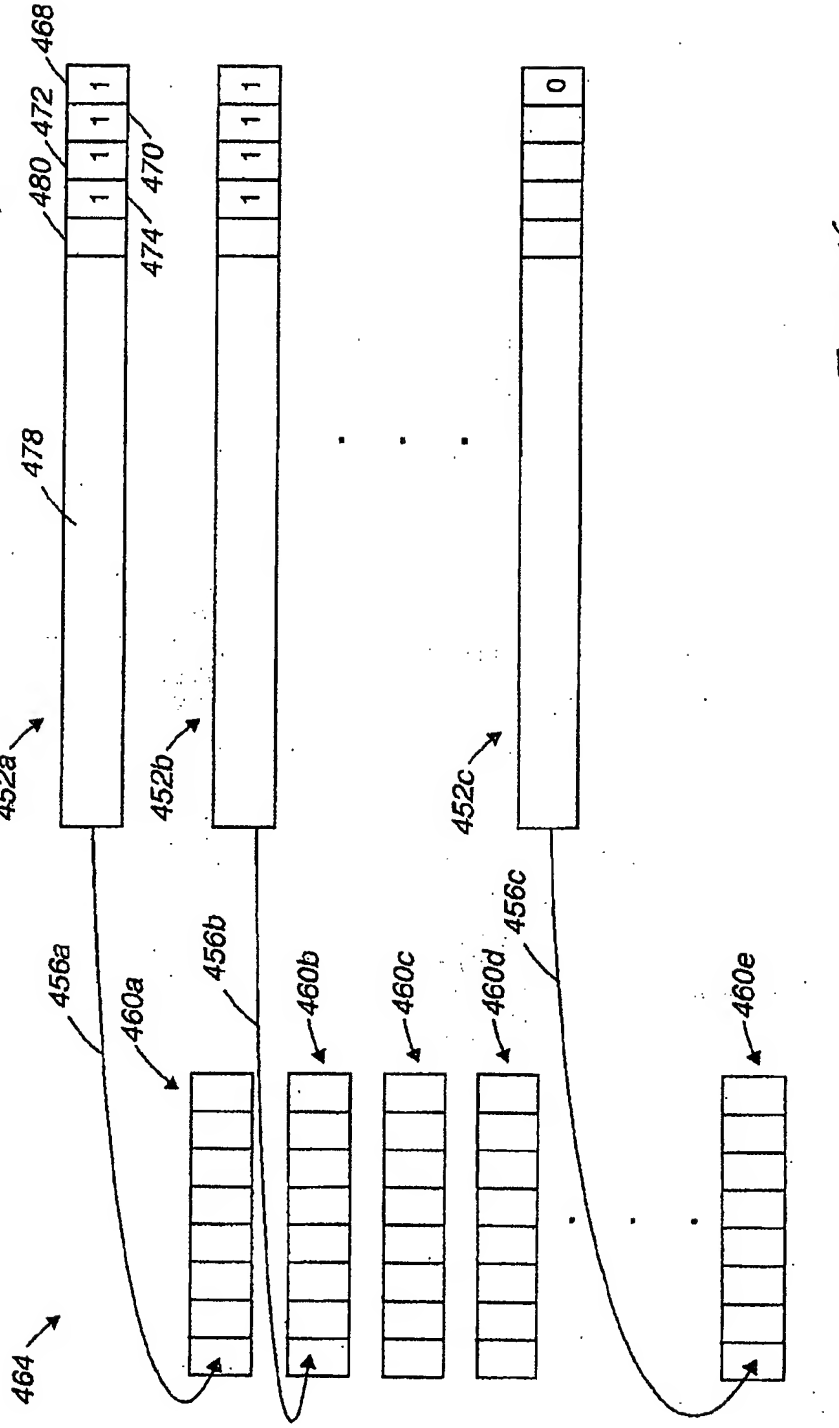

450
468
472
480
470
474
478
452a
452b
452c
456a
456b
456c
460a
460b
460c
460d
460e
464
1
1
1
1
1
1
1
1
1
0

Figure 4b

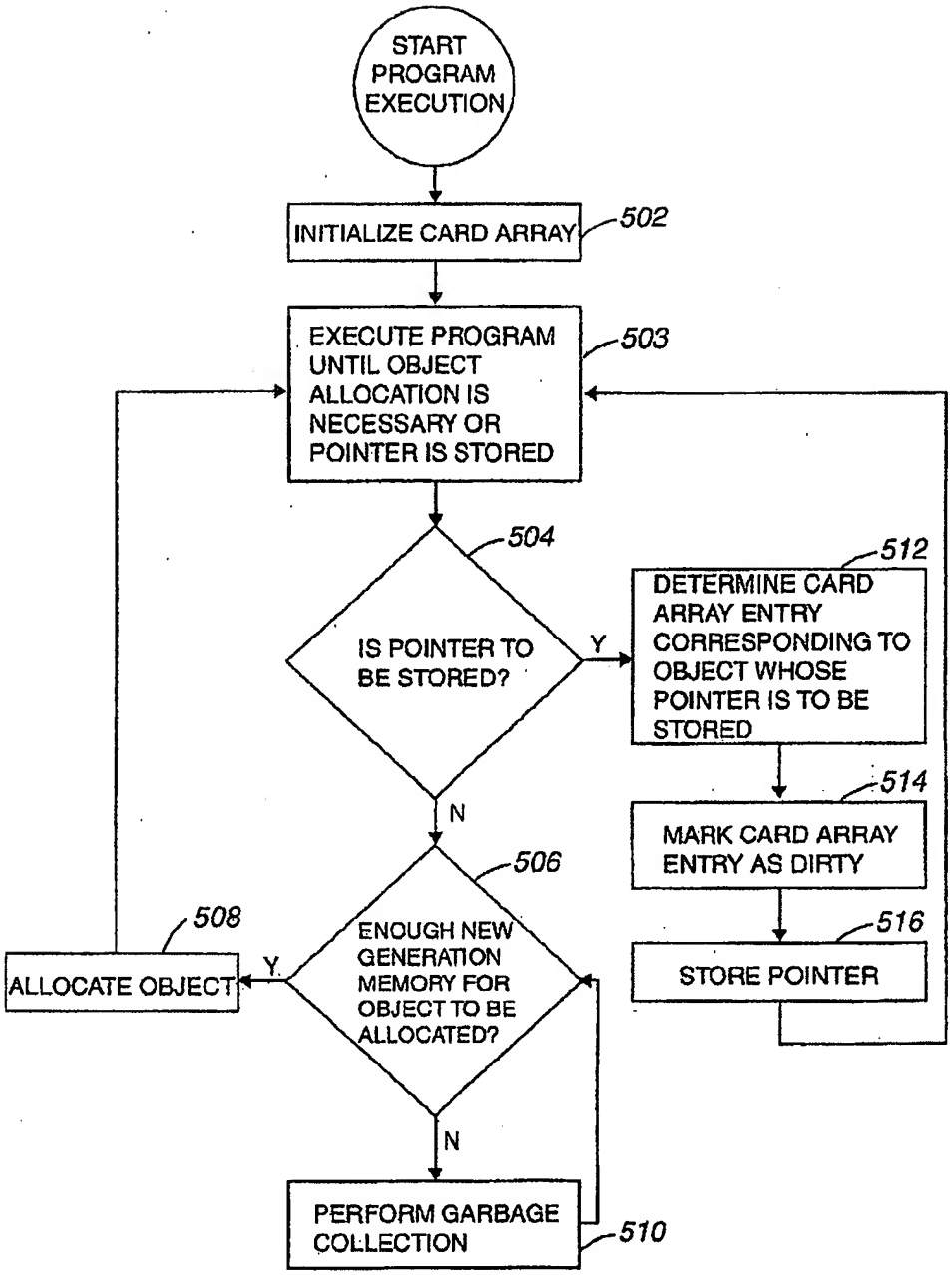

START PROGRAM EXECUTION
INITIALIZE CARD ARRAY
502
EXECUTE PROGRAM UNTIL OBJECT ALLOCATION IS NECESSARY OR POINTER IS STORED
503
504
IS POINTER TO BE STORED?
Y
N
512
DETERMINE CARD ARRAY ENTRY CORRESPONDING TO OBJECT WHOSE POINTER IS TO BE STORED
514
MARK CARD ARRAY ENTRY AS DIRTY
516
STORE POINTER
506
ENOUGH NEW GENERATION MEMORY FOR OBJECT TO BE ALLOCATED?
Y
N
508
ALLOCATE OBJECT
PERFORM GARBAGE COLLECTION
510

Figure 5

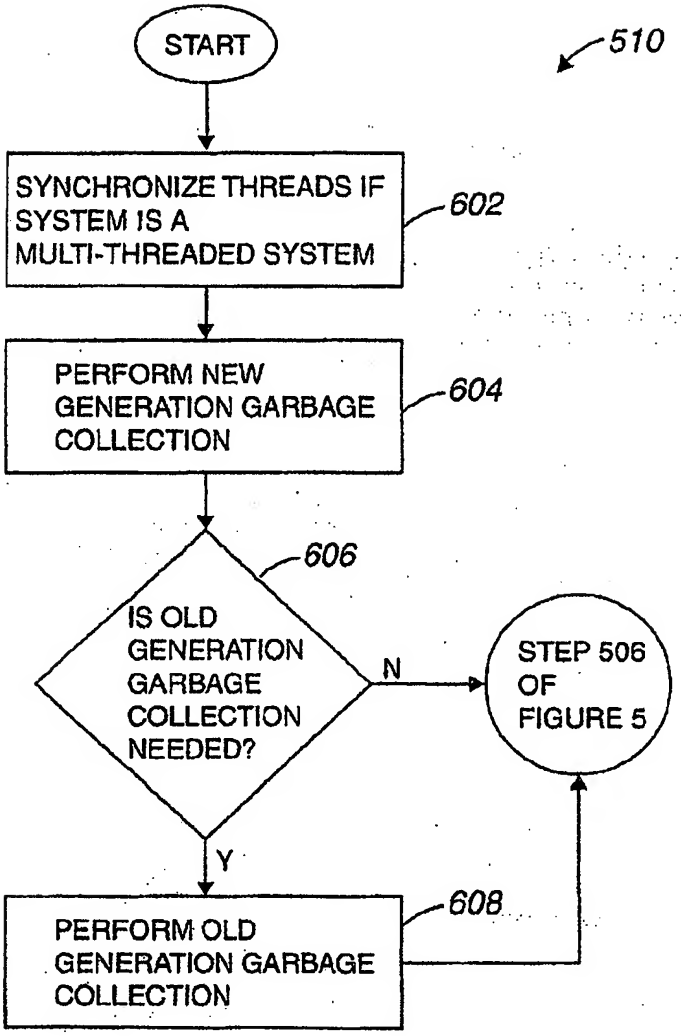

START
510
SYNCHRONIZE THREADS IF SYSTEM IS A MULTI-THREADED SYSTEM
602
PERFORM NEW GENERATION GARBAGE COLLECTION
604
606
IS OLD GENERATION GARBAGE COLLECTION NEEDED?
N
STEP 506 OF FIGURE 5
Y
PERFORM OLD GENERATION GARBAGE COLLECTION
608

Figure 6

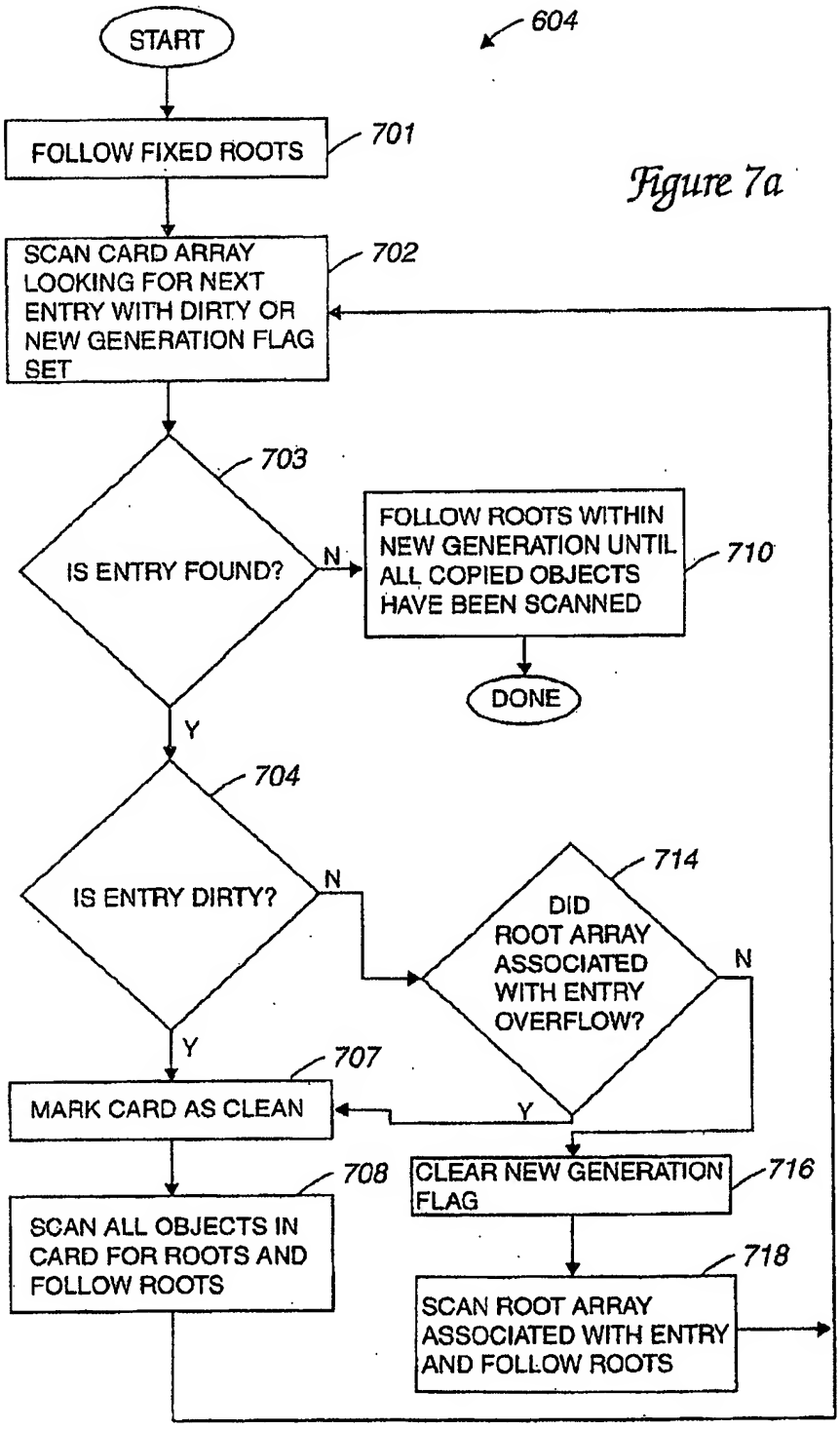

604
START
FOLLOW FIXED ROOTS
701
SCAN CARD ARRAY LOOKING FOR NEXT ENTRY WITH DIRTY OR NEW GENERATION FLAG SET
702
703
IS ENTRY FOUND?
N
FOLLOW ROOTS WITHIN NEW GENERATION UNTIL ALL COPIED OBJECTS HAVE BEEN SCANNED
710
DONE
Y
704
IS ENTRY DIRTY?
N
714
DID ROOT ARRAY ASSOCIATED WITH ENTRY OVERFLOW?
N
Y
Y
707
MARK CARD AS CLEAN
708
SCAN ALL OBJECTS IN CARD FOR ROOTS AND FOLLOW ROOTS
CLEAR NEW GENERATION FLAG
716
718
SCAN ROOT ARRAY ASSOCIATED WITH ENTRY AND FOLLOW ROOTS

Figure 7a

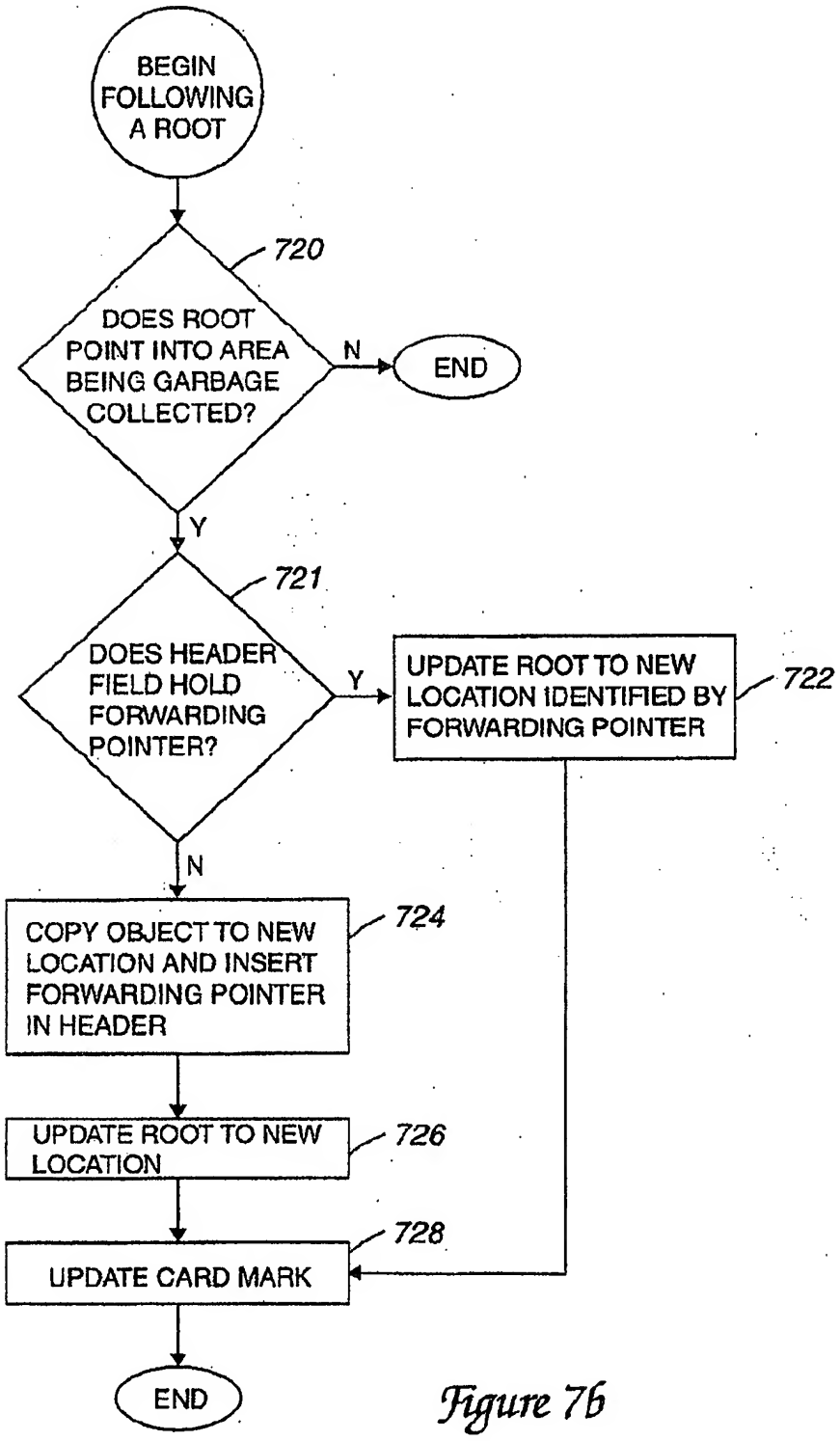
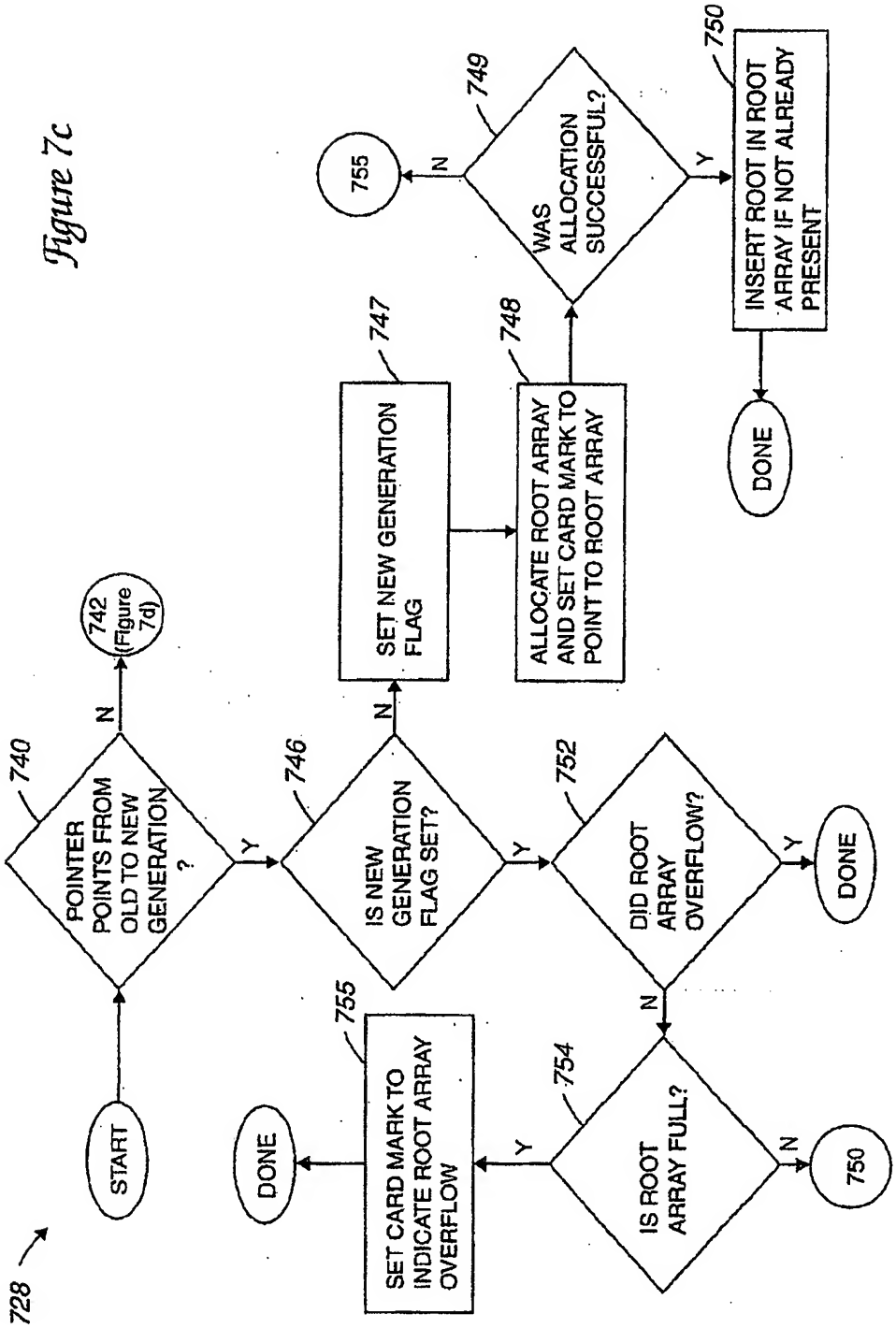

BEGIN FOLLOWING A ROOT
720
DOES ROOT POINT INTO AREA BEING GARBAGE COLLECTED?
N
END
Y
721
DOES HEADER FIELD HOLD FORWARDING POINTER?
Y
UPDATE ROOT TO NEW LOCATION IDENTIFIED BY FORWARDING POINTER
722
N
COPY OBJECT TO NEW LOCATION AND INSERT FORWARDING POINTER IN HEADER
724
UPDATE ROOT TO NEW LOCATION
726
UPDATE CARD MARK
728
END

Figure 7b

Figure 7c


728
START
740
POINTER POINTS FROM OLD TO NEW GENERATION ?
N
742 (Figure 7d)
Y
746
IS NEW GENERATION FLAG SET?
N
747
SET NEW GENERATION FLAG
Y
752
DID ROOT ARRAY OVERFLOW?
Y
DONE
N
754
IS ROOT ARRAY FULL?
Y
755
SET CARD MARK TO INDICATE ROOT ARRAY OVERFLOW
DONE
N
750
748
ALLOCATE ROOT ARRAY AND SET CARD MARK TO POINT TO ROOT ARRAY
749
WAS ALLOCATION SUCCESSFUL?
N
755
Y
750
INSERT ROOT IN ROOT ARRAY IF NOT ALREADY PRESENT
DONE

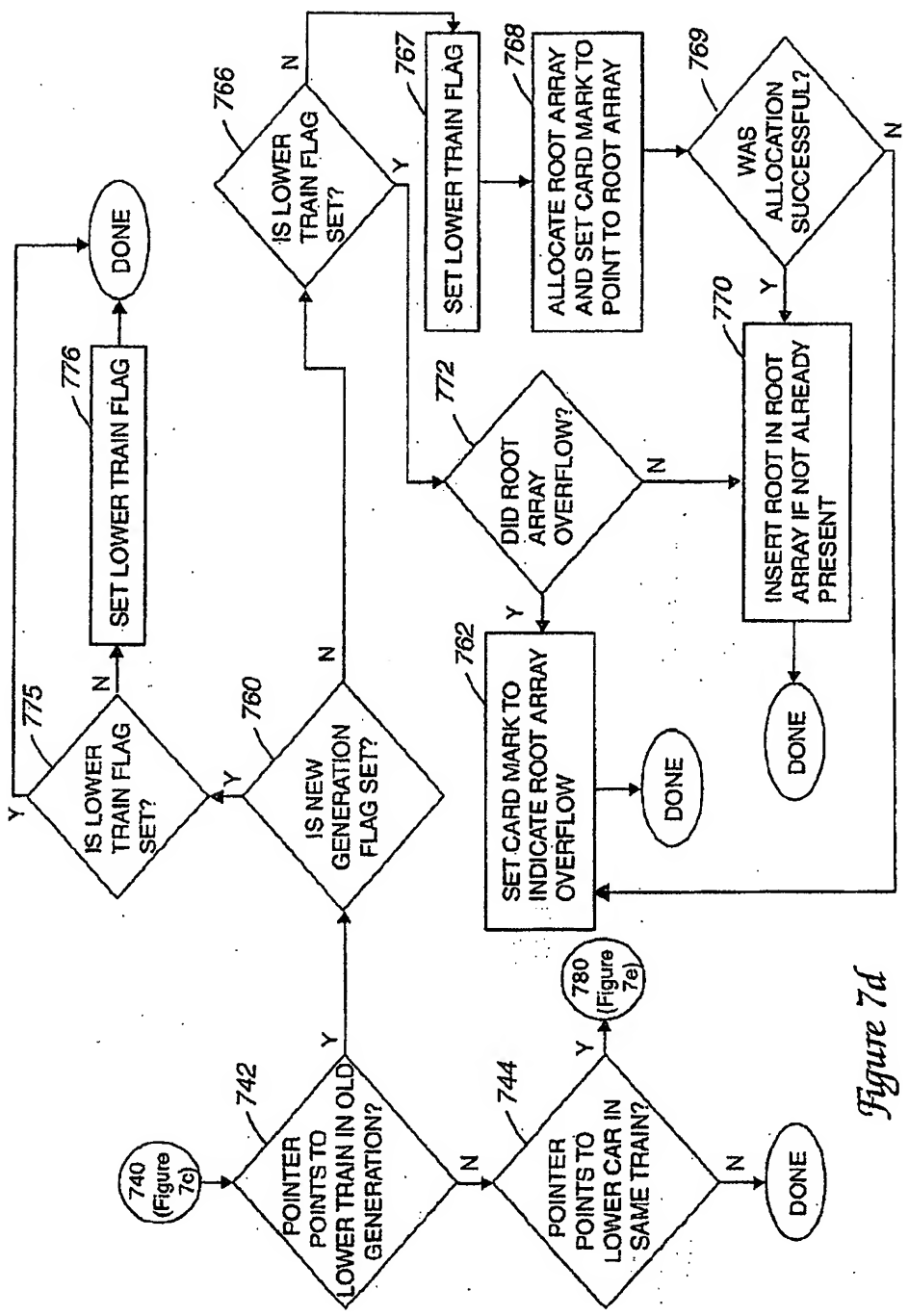
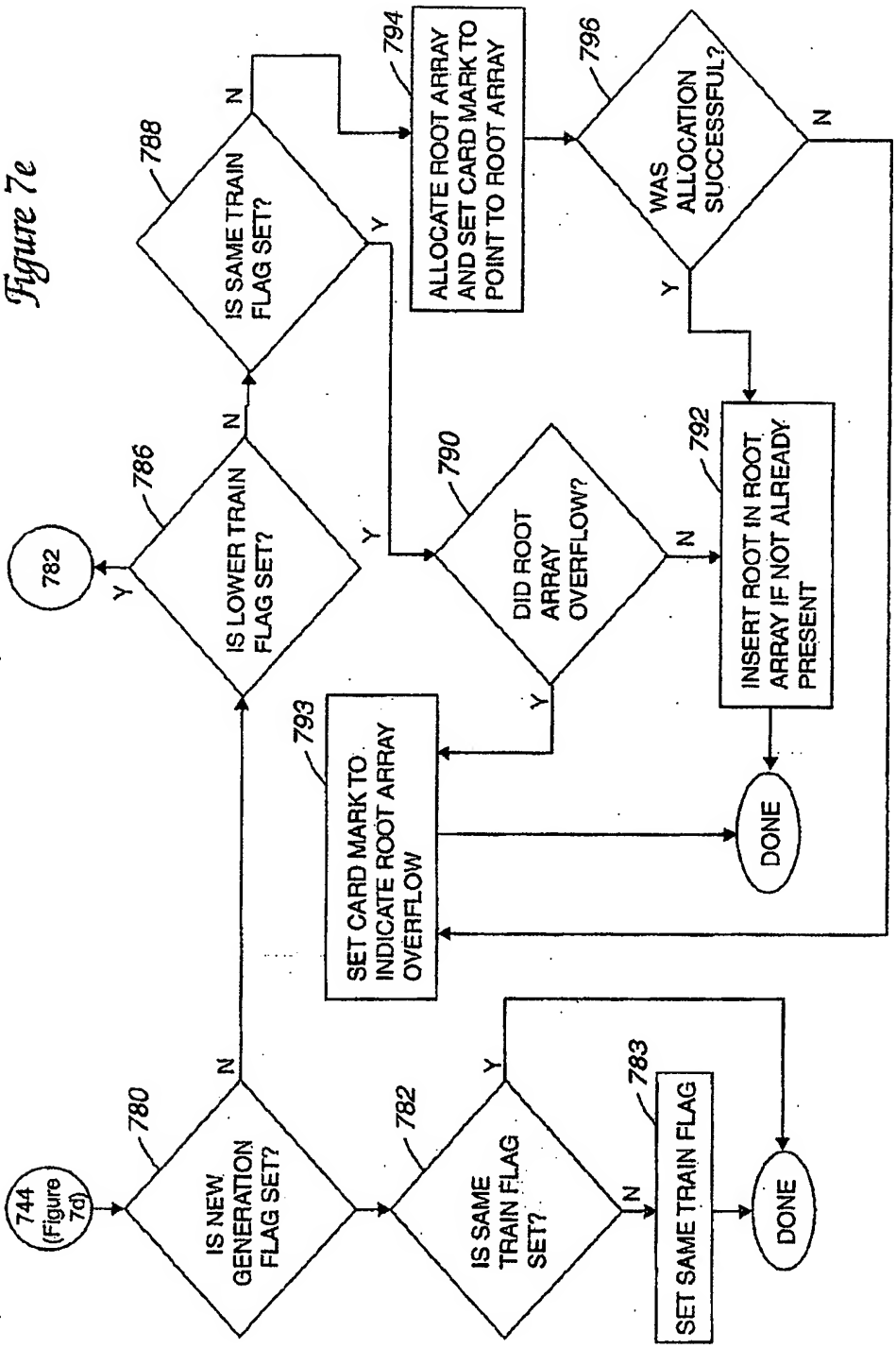

740 (Figure 7c)
742
POINTER POINTS TO LOWER TRAIN IN OLD GENERATION?
744
POINTER POINTS TO LOWER CAR IN SAME TRAIN?
780 (Figure 7e)
DONE
760
IS NEW GENERATION FLAG SET?
762
SET CARD MARK TO INDICATE ROOT ARRAY OVERFLOW
DONE
772
DID ROOT ARRAY OVERFLOW?
770
INSERT ROOT IN ROOT ARRAY IF NOT ALREADY PRESENT
DONE
769
WAS ALLOCATION SUCCESSFUL?
768
ALLOCATE ROOT ARRAY AND SET CARD MARK TO POINT TO ROOT ARRAY
767
SET LOWER TRAIN FLAG
766
IS LOWER TRAIN FLAG SET?
775
IS LOWER TRAIN FLAG SET?
776
SET LOWER TRAIN FLAG
DONE
Y
N

Figure 7d

Figure 7e


744 (Figure 7d)
780
IS NEW GENERATION FLAG SET?
782
IS SAME TRAIN FLAG SET?
783
SET SAME TRAIN FLAG
DONE
786
IS LOWER TRAIN FLAG SET?
782
788
IS SAME TRAIN FLAG SET?
790
DID ROOT ARRAY OVERFLOW?
792
INSERT ROOT IN ROOT ARRAY IF NOT ALREADY PRESENT
793
SET CARD MARK TO INDICATE ROOT ARRAY OVERFLOW
794
ALLOCATE ROOT ARRAY AND SET CARD MARK TO POINT TO ROOT ARRAY
796
WAS ALLOCATION SUCCESSFUL?
DONE
Y
N

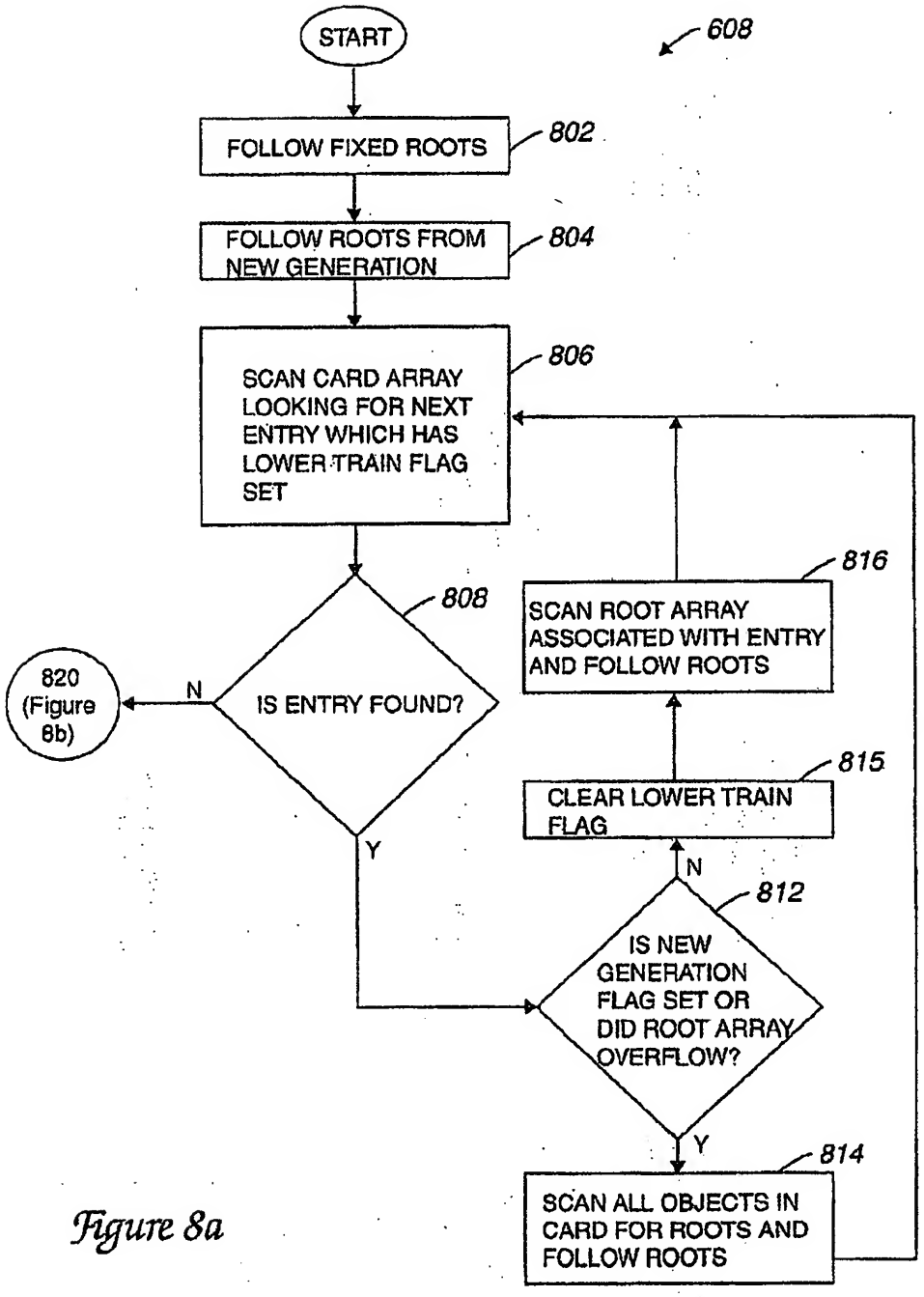

START
608
FOLLOW FIXED ROOTS
802
FOLLOW ROOTS FROM NEW GENERATION
804
SCAN CARD ARRAY LOOKING FOR NEXT ENTRY WHICH HAS LOWER TRAIN FLAG SET
806
808
IS ENTRY FOUND?
N
820 (Figure 8b)
Y
816
SCAN ROOT ARRAY ASSOCIATED WITH ENTRY AND FOLLOW ROOTS
815
CLEAR LOWER TRAIN FLAG
N
812
IS NEW GENERATION FLAG SET OR DID ROOT ARRAY OVERFLOW?
Y
814
SCAN ALL OBJECTS IN CARD FOR ROOTS AND FOLLOW ROOTS

Figure 8a

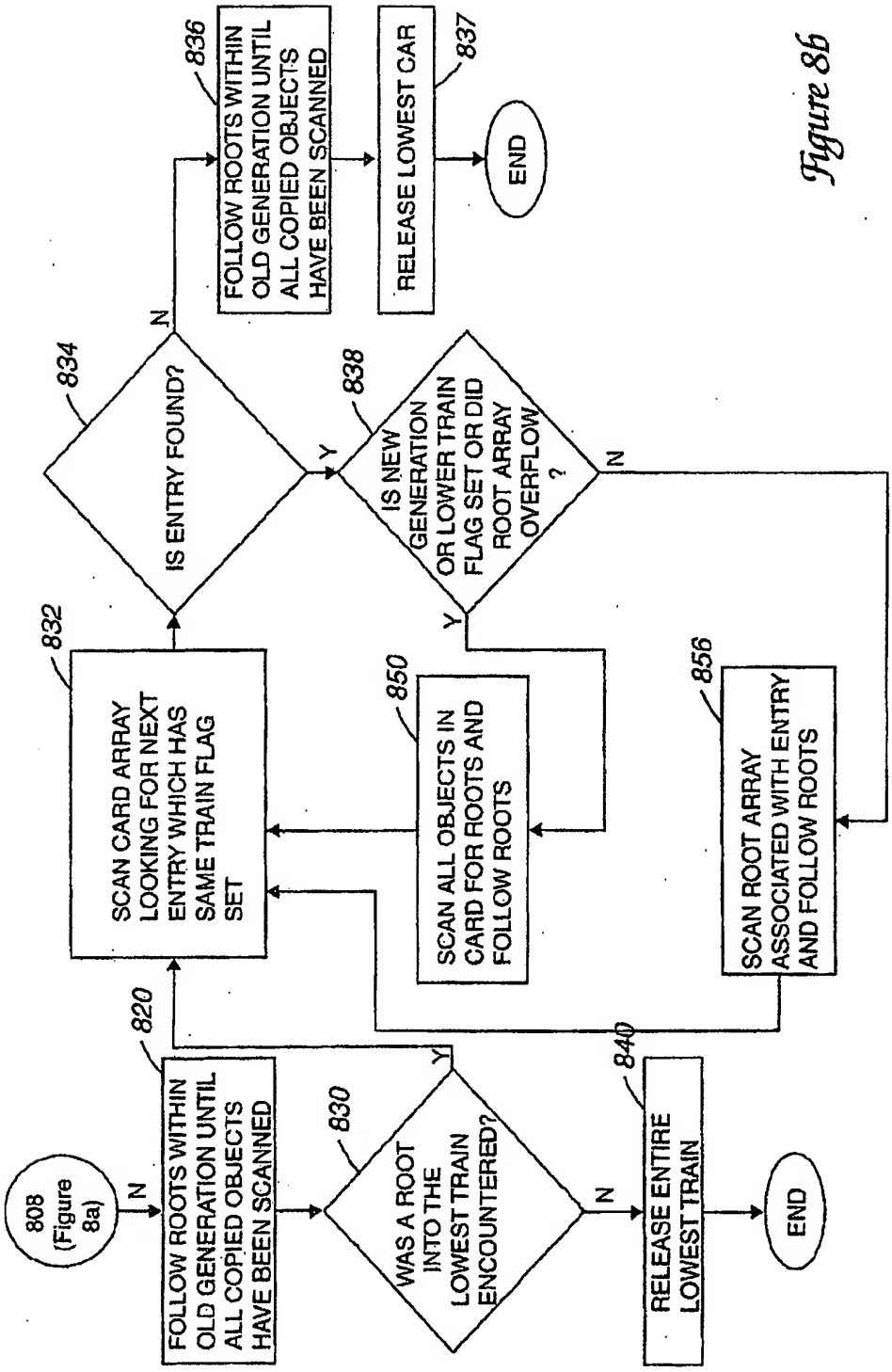

808 (Figure 8a)
N
820
FOLLOW ROOTS WITHIN OLD GENERATION UNTIL ALL COPIED OBJECTS HAVE BEEN SCANNED
830
WAS A ROOT INTO THE LOWEST TRAIN ENCOUNTERED?
Y
N
840
RELEASE ENTIRE LOWEST TRAIN
END
832
SCAN CARD ARRAY LOOKING FOR NEXT ENTRY WHICH HAS SAME TRAIN FLAG SET
834
IS ENTRY FOUND?
Y
N
836
FOLLOW ROOTS WITHIN OLD GENERATION UNTIL ALL COPIED OBJECTS HAVE BEEN SCANNED
837
RELEASE LOWEST CAR
END
838
IS NEW GENERATION OR LOWER TRAIN FLAG SET OR DID ROOT ARRAY OVERFLOW ?
Y
N
850
SCAN ALL OBJECTS IN CARD FOR ROOTS AND FOLLOW ROOTS
856
SCAN ROOT ARRAY ASSOCIATED WITH ENTRY AND FOLLOW ROOTS

Figure 8b

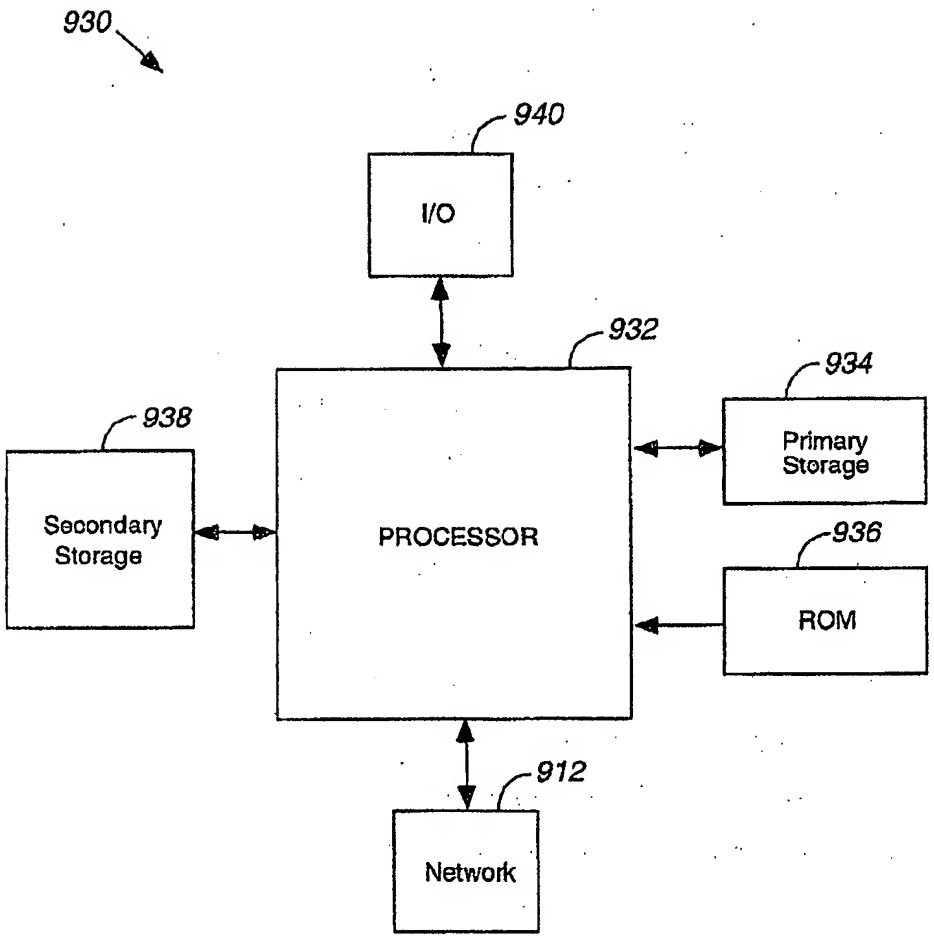

930
940
I/O
932
934
938
Primary Storage
Secondary Storage
PROCESSOR
936
ROM
912
Network

Figure 9

1 Abstract

The present invention relates to methods and apparatus for performing generational garbage collection within computer memory. According to one aspect of the present invention, a computer-implemented method for dynamically managing memory which includes a first memory section and a second memory section that is divided into a plurality of blocks each having an associated marker, includes performing a first garbage collection on the first memory section. The method also includes performing a second garbage collection on a selected one of the blocks in the second memory section. A third garbage collection is performed on the selected block in the second memory section. The third garbage collection includes determining whether the selected block includes a first object which references a second object which is not included in the selected block based at least in part on a status indicated by the marker associated with the selected block. The status includes an indication of whether the reference to the second object was stored after the second garbage collection was performed, and if the reference to the second object was stored after the second garbage collection was performed, a new root array is created using the selected marker.

2 Representative Drawing

Fig. 5